

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE**

PAR

CARLOS ORTIZ

**DÉVELOPPEMENT D'UN PROTOTYPE DE SYSTÈME EXPERT EN
ÉLECTROTHERMIE**

JANVIER 1995

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

À ma mère et à la mémoire de mon père

RÉSUMÉ

Ce travail porte sur l'utilisation de la programmation par objets pour développer un prototype de système expert en électrothermie. Pour ce faire, nous avons utilisé un système de développement commercial vide et nous lui avons rajouté une partie des connaissances qu'on utilise normalement pour résoudre des problèmes dans le domaine électrothermique. Le système de développement commercial choisi à cette effet est LEVEL5 OBJECT, conçu pour opérer dans un environnement Windows. La création d'un système expert implique la création d'une base de connaissances. LEVEL5 OBJECT permet de créer des bases de connaissances sans que nous ayons à programmer des procédures compliquées dans des langages de cinquième génération, le système permet d'y arriver par l'entremise d'un éditeur d'objets, d'un éditeur de fenêtres graphiques et d'un éditeur de règles, de méthodes et de daemons qu'une base de connaissances est créée. Le tout se fait presque de façon graphique et très similaire à la façon dont on gère des programmes dans un environnement Windows. Comme première approche nous avons effectué certains calculs thermiques à l'aide des objets ou classes, des méthodes WHEN CHANGED, des règles et des fenêtres graphiques propres au système de développement LEVEL5 OBJECT. Cette démarche nous a permis en principe d'aborder le concept d'intelligence artificielle de manière pratique et aussi d'explorer l'énorme capacité de convivialité d'autres programmes en matière d'échange d'information. La technologie associée aux systèmes experts est très applicable à la pratique de l'électrothermie, car elle permet dans un premier temps de regrouper dans une base commune la plupart de connaissances dans le domaine. En deuxième lieu, un système expert permet d'accéder et de manipuler différentes informations d'une manière plus rapide et efficace qu'autrefois le permettaient les langages de procédure, les premières applications de bases de données, les moyens audiovisuels et toute autre représentation graphique ou écrite des connaissances dans le domaine électrothermique et dans d'autres domaines connexes.

REMERCIEMENTS

Je remercie mon directeur de maîtrise, monsieur Adam Skorek pour tout son support le long de mon séjour à l'Université de Québec à Trois-Rivières. Ceci m'a permis d'avoir une meilleure perspective des horizons possibles dans le recherche scientifique.

Je remercie également mon codirecteur de recherche monsieur Marek Zaremba, monsieur Anatole Sévigny professeur au département d'ingénierie et mon confrère David Brillon pour ses conseils en intelligence artificielle.

En dernier je tiens à remercier du fond de mon coeur ma famille pour tout leur support et encouragement le long de mes études.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
REMERCIEMENTS.	ii
LISTE DES SYMBOLES	vi
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	x
INTRODUCTION.	1
CHAPITRE I	
LES SYSTÈMES EXPERTS ET LEURS CARACTÉRISTIQUES	4
1.1 Généralités	4
1.2 Qu'est-ce qu'un système expert	4
1.3 Structure de base des systèmes experts	7
1.3.1 La base des connaissances	10
1.3.2 L'interface usager.	12
1.3.3 Le moteur d'inférence	13
1.4 Principes théoriques de fonctionnement des systèmes experts	14
1.4.1 Les systèmes experts orientés sur les objets	14
1.4.2 Les systèmes experts basés sur les règles	17
1.5 Outils disponibles pour la création des systèmes experts	20
1.6 Domaines d'application des systèmes experts	23
1.6.1 Exemple d'application de systèmes experts	24
CHAPITRE II	
LES SYSTÈMES EXPERTS EN ÉLECTROTHERMIE	
2.1 Généralités	32
2.2 Cycle de vie d'un système expert en électrothermie	32

2.3	Répertoire des codes d'analyse numérique couramment utilisés en électrothermie	50
2.3.1	FLUX2D de Cédrat SA	50
2.3.2	FLUX3D de Cédrat SA	53
2.3.3	DISPLAY3 de NISA	54
2.3.4	AUTOTHERM de Mentor Graphics	55
2.4	Conception d'interfaces de protocole de communication entre un système expert en électrothermie et les divers codes d'analyse répertoriés	57

CHAPITRE III

CRÉATION D'UNE BASE DE CONNAISSANCES EN ÉLECTROTHERMIE

3.1	Généralités	62
3.2	Concepts de base	65
3.2.1	Calcul des pertes résistives dans les conducteurs	66
3.2.2	Calcul des pertes résistives en tenant compte de l'effet de la température sur la résistance des conducteurs	68
3.2.3	Calcul des pertes résistives en tenant compte de l'effet pelliculaire à hautes fréquences	70
3.2.4	Calcul des pertes dans les circuits magnétiques des transformateurs et des moteurs	74
3.2.5	Calcul des pertes dans les composants électroniques de puissance	78
3.2.6	Calcul des pertes dans les composants microélectroniques	81
3.2.7	Calcul du coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle	82
3.2.8	Calcul du coefficient de transfert de chaleur par radiation	89
3.3	Stratégie d'implantation d'une banque de connaissances bibliographiques en électrothermie	96
3.4	Stratégie d'implantation pour la conception d'une interface de communication entre LEVEL5 OBJECT et le code de simulation numérique nisa386	98
3.5	Implantation des algorithmes d'optimisation thermique	101
3.6	Applications reliées aux systèmes de mesure	103
3.6.1	Mesure thermique par caméra Infrarouge	104
3.6.2	Les systèmes multimédia et leur utilité dans le développement d'un système expert	104
3.6.2.1	Le système multimédia VIDEO for Windows	106
3.6.2.2	Le système multimédia VIDEOSPIGOT for Windows	108

CHAPITRE IV

ÉTUDE DES SYSTÈMES DE DÉVELOPPEMENT

4.1	Généralités	110
4.1.1	ART (Automated Reasonning Tool)	111
4.1.2	EXYS	114
4.1.3	KEE (Knowledge Engineering Environement)	115
4.1.4	PICON (Process Intelligent CONtrol)	116
4.2	Essai préliminaire avec un système existant	117
4.2.1	Le fichier pertes.knb	119
4.2.2	Le fichier toles.knb	119
4.2.3	Le fichier semicon.knb	120
4.2.4	Le fichier ic.knb	120
4.2.5	Le fichier convec.knb	120
4.2.5	Le fichier radiat.knb	121
4.2.6	Le fichier nisa.knb	121
4.3	Recommandations	122
	CONCLUSION	122
	RÉFÉRENCES	124
	Annexe A	126

LISTE DES SYMBOLES

V :	Différence de potentiel
I :	Intensité de courant
R :	Résistance
$V(t)$:	Tension alternative
$I(t)$:	Courant alternatif
φ :	Angle de déphasage entre la tension et le courant
R_0 :	Résistance d'un matériau conducteur à 0 °C
R_{20} :	Résistance d'un matériau conducteur à 20 °C
α_0 :	Coefficients de température à 0 °C
α_{20} :	Coefficients de température à 20 °C
R_1 :	Résistance à la température T_1
R_2 :	Résistance à la température T_2
i_x :	Densité de courant à la distance x de la périphérie
i_0 :	Densité de courant à la surface du conducteur
δ :	Profondeur de pénétration du courant
$P(\delta)$:	Distribution de puissance de dissipation par effet pelliculaire
ρ :	Résistivité d'un matériau conducteur
f :	Fréquence d'opération
μ_r :	Perméabilité magnétique relative d'un matériau conducteur
R' :	Résistance efficace d'un conducteur cylindrique à haute fréquence
a :	Rayon du conducteur
K_f :	Constante associée aux pertes par courants de Foucault dans les tôles magnétiques.
K_h :	Constante associée aux pertes par hystérésis dans les tôles magnétiques.
V_f :	Volume de fer utilisé.
B_{max} :	Valeur d'induction maximale

V_d :	Tension aux bornes d'un semi-conducteur
V_{on} :	Tension aux bornes d'un semi-conducteur pendant la conduction
I_o :	Courant efficace dans un semi-conducteur pendant la conduction
$t_{d(on)}$:	Temps de délai pendant la conduction
$t_{d(off)}$:	Temps de délai au blocage
t_{ri} :	Temps de montée du courant
t_{rv} :	Temps de montée de la tension
t_{fi} :	Temps de descente du courant
t_{fv} :	Temps de descente de la tension
$t_{c(on)}$:	Temps de transition entre le blocage et la conduction
$t_{c(off)}$:	Temps de transition entre la conduction et le blocage
P_s	Puissance de dissipation associée à la commutation
P_{on} :	Puissance de dissipation associée à la conduction
Q :	Chaleur totale transmise
h :	Coefficient de convection naturelle
\bar{h} :	Approximation du coefficient de convection naturelle
A :	Aire de la surface refroidie.
L :	Longueur caractéristique des surfaces refroidies
T_a :	Température ambiante.
T_s :	Température de surface
k :	Conductivité thermique
\overline{Nu}_l :	Nombre de Nusselt
Gr_l :	Nombre de Grassof
Pr :	Nombre de Prandtl
μ :	Coefficient de viscosité dynamique
C_p :	Chaleur spécifique
Δt :	Différence de température

- σ : Constante d'Stefan-Boltzman égale à $5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{Watts}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ \text{K}^4}$
- f_{1-2} : Facteur de forme entre les surface 1 et 2
- e_1 : Coefficient d'emissivité d'une surface 1
- e_2 : Coefficient d'emissivité d'une surface 2
- ϕ_1 : Angle entre le vecteur dA_1 et le vecteur r qui le relie au vecteur dA_2
- ϕ_2 : Angle entre le vecteur dA_2 et le vecteur r qui le relie au vecteur dA_1
- P_{typ} : Puissance typique de dissipation dans un circuit intégré
- V_{cctyp} : Différence de potentiel de source (Typique)
- I_{cctyp} : Courant de source (Typique)
- pinout: Nombre de broches de sortie
- P_{sortie} : Puissance d'activation d'une sortie
- I_{ol} : Courant de sortie en niveau bas
- V_{ol} : Tension de sortie en niveau bas

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Architecture classique d'un système expert	7
1.2	Représentation d'un rotor à cage sous forme de cadre	15
1.3	Représentation de la structure de la base de connaissances de PROMITHEAS	25
1.4	Représentation du programme d'entretien de PROMITHEAS	26
1.5	Présentation du menu du système PROMITHEAS	27
1.6	Arborescence de réparation de PROMITHEAS	27
1.7	Arborescence d'entretien de PROMITHEAS	28
3.1	Profondeur de la pénétration du courant	71
3.2	Méthode graphique de calcul des pertes fer pour des tôles de 4 millièmes de pouce SUPERMENDOR et SILICON	77
3.3	Interrupteur générique contrôlable	78
3.4	Caractéristiques de commutations génériques linéarisées: (a) circuit inductif de commutation simple (b) formes d'onde de commutation (c) puissance instantanée de commutation	79
3.5	Profil de convection naturelle sur une plaque verticale	86
3.6	Plaque chauffante horizontale placée vers le haut	87
3.7	Plaque chauffante placée vers le bas	88
3.8	Géométrie d'échange de radiation entre deux surfaces	93
3.9	Facteur de forme pour deux plaques parallèles	95
3.10	Facteur de forme pour deux plaques perpendiculaires	95
4.1	Affichage de dialogue	118

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1 Outils utilisées pour le développement de systèmes experts	22
1.2 Langages de programmation utilisés pour le développement de systèmes experts	22
3.1 Coefficients de température α des matériaux conducteurs à 0 et 20 °C	69
3.2 Ratios d'effet pelliculaire	74
3.3 Longueurs caractéristiques de certaines surfaces	85
3.4 Emissivité typique à 100 °C	90
3.5 Facteur d'émissivité équivalent pour différentes configurations	92

INTRODUCTION

Le cadre conceptuel et les tendances caractéristiques dans le domaine de l'informatique ont fortement été influencés par l'arrivée des langages de cinquième génération. Un tel précédent a eu comme conséquence directe d'aider à l'évolution et à l'amélioration considérable des méthodes d'analyse et de diagnostic, dans presque tous les domaines où un sens stricte de l'organisation et l'efficacité dans l'exécution des tâches se sont toujours imposés.

L'approche classique de l'informatisation des systèmes ne gravite plus autour de l'implantation de logiciels de traitement de données numériques. Une telle approche doit aujourd'hui céder sa place au nouveau concept de l'intelligence artificielle. L'accès à l'information sous presque toutes ses formes possibles est de plus en plus réalisable, grâce aux derniers développements en matière de systèmes experts, qui ont été amorcés dans les années 60. Une première version de système expert a vu le jour au début des années 70. L'intérêt commercial qui en résultait a poussé les concepteurs de l'époque à développer des outils pour les systèmes en question. C'est par la suite au milieu des années 80 qu'on finit par introduire des outils pour construire des systèmes et des environnements sans requérir la présence d'un expert en intelligence artificielle [1] . Aujourd'hui la plupart de ces outils ont été adaptés à des besoins spécifiques et leurs dernières versions sont utilisées partout où l'informatisation des systèmes a été rendue possible. Des domaines tels que la neurochirurgie, la comptabilité, l'assurance, le contrôle, la défense aérienne, la production et le transport de l'énergie électrique, l'entretien des lignes de transport etc., possèdent si pas une, plusieurs versions de systèmes experts. Il faut toutefois admettre que certains domaines accusent du retard en ce qui concerne l'intégration de cette technique dans leur gestion des opérations et le domaine de l'électrothermie n'est pas exclu de la liste.

Et si on examine de près la façon dont on procède dans la conception des systèmes électriques et électroniques, nous pouvons nous rendre compte à quel point l'aspect thermique est souvent négligé.

D'une certaine manière les phénomènes thermiques dans les équipements électriques et électroniques ne peuvent plus être pris à la légère. À l'heure actuelle les concepteurs possèdent les moyens nécessaires pour analyser et évaluer de manière rapide un grand nombre des différents scénarios de conception, une telle tendance dans le secteur industriel peut permettre facilement le développement de produits beaucoup plus fiables qui vont plus vite se retrouver dans le marché. Donc, avant d'aller plus loin il vaut la peine de mentionner quelle est la vocation première de l'électrothermie.

L'électrothermie industrielle est le domaine de l'ingénierie qui s'intéresse à tous les aspects de la transformation de l'énergie électrique en chaleur. Ceci comprend deux volets principaux:

Celui de la conception et l'analyse des procédés électrothermiques de chauffage: par induction, par conduction, par résistances, par infrarouge, par hystérésis diélectrique, par arc électrique, par plasma, par bombardement électrique et par laser.

Celui de l'analyse des contraintes thermiques dans: les machines tournantes, les transformateurs, les appareils électriques, les circuits intégrés et les systèmes électriques et électroniques d'une certaine complexité.

Le champ d'application du premier volet est celui dans lequel on tire un bénéfice de la transformation de l'énergie électrique. Le champ d'application du deuxième volet est celui dans lequel les retombées néfastes de la transformation de l'énergie électrique constituent un sujet de recherche scientifique et c'est dans cette direction que s'orientent les activités du Laboratoire

d'Électrothermie de l'Université de Québec à Trois-Rivières, institution au sein de laquelle on a fondé récemment la première Chaire de recherche en électrothermie de l'Amérique du Nord. La pratique de l'électrothermie tel que décrit dans le deuxième volet de définition se fait par l'entremise de la conception assistée par ordinateur, de la simulation numérique, de l'application des algorithmes d'optimisation, de l'instrumentation et la mesure et de l'application de nouvelles techniques de refroidissement telles que:

- le refroidissement par caloducs
- le refroidissement par effet Peltier ou refroidissement thermoélectrique
- le refroidissement par rails thermiques
- le refroidissement par thermosiphon et autres.

Donc, le but premier de la conception d'un système expert en électrothermie est celui de rendre plus efficace et plus intelligente la pratique de cette discipline de recherche. Il va de soi que plusieurs autres disciplines vont bénéficier des progrès qui pourront être accomplis par l'implantation du concept d'intelligence artificielle dans le savoir faire en électrothermie.

CHAPITRE I

LES SYSTÈMES EXPERTS ET LEURS CARACTÉRISTIQUES.

1.1 Généralités

Un système experts comme tout autre système de traitement de l'information possède une structure de base inhérente avec ses différentes composantes ou périphériques et ses environnements et langages de programmation basés sur les implantations matérielles et logicielles des systèmes d'information déjà existants, mais toutefois orientés sur les concepts de l'intelligence artificielle dont les systèmes de vision, les systèmes de traitement de la parole, les réseaux de neurones et la logique floue sont redevables.

1.2 Qu'est-ce qu'un système expert

Un système expert en soit, est un programme d'ordinateur qui utilise la connaissance, les faits et les techniques de raisonnement pour résoudre des problèmes dont la complexité exige l'application d'une expertise humaine appropriée [1]. De tels programmes d'ordinateur sont en général des programmes de haut niveau, conçus pour acquérir le savoir d'experts dans un domaine et le rendre disponible aux utilisateurs potentiels.

La connaissance dans un système expert est représentée à partir d'un ensemble de règles de bon jugement ou d'heuristiques sur l'état ou le comportement des éléments d'un domaine en particulier. Les règles en générale décrivent une condition suivie d'une implication de ladite condition. Un exemple de règle peut s'énoncer comme suit: "SI la protection de distance d'un départ de ligne de transport envoie un ordre de déclenchement par phase sur deux phases seulement ALORS impression d'un message signalant l'anomalie de ce fonctionnement. Les faits en tant que tels constituent l'éventail d'information sur lequel les experts dans un domaine partagent un avis commun. Ils peuvent prendre la forme d'une occurrence ou un événement,

d'une structure de données qui fournit de l'information sur des valeurs de données obtenues, d'information pertinente à un cas en particulier etc. Dans la plupart de systèmes experts les faits prennent la forme d'une expression logique construite à partir de prédicats ou attributs et de valeurs spécifiques qui leur sont associées. L'indice de performance d'un système expert s'évalue donc en termes de la taille et de la qualité de la connaissance qu'il possède.

Avec l'implantation des systèmes experts on cherche en quelque sorte à remplacer un expert qui n'est pas disponible, à assimiler la connaissance et l'expérience de plusieurs experts, à fournir de l'expertise dans des projets qui n'ont pas le moyen d'assurer la présence d'un expert sur les lieux. D'innombrables bénéfices peuvent être associés à la conception et l'utilisation de systèmes experts. De façon plus détaillée ces derniers sont en mesure de:

Rendre les avoirs intangibles en avoirs tangibles. Lorsque les compagnies retiennent les services d'un expert, elles le font pour un temps déterminé, ce qui ne représente pas nécessairement un investissement efficace, comparativement aux investissements tangibles tels que les équipements. Lorsque l'expert quitte les lieux le retour sur l'investissement n'a pas nécessairement une continuité et le processus d'embauche est à recommencer. Produire un système expert qui puisse posséder le savoir d'un expert permet alors à une compagnie d'acheter une expertise et de la rendre un avoir capital en termes d'une ressource qu'elle possède et qu'elle contrôle à son gré.

Les systèmes experts ne connaissent pas d'impasse. Les systèmes experts dépassent la capacité de performance des humains sur un aspect au moins. Ils sont insensibles aux effets d'une mauvaise journée au travail ou au foyer, d'un surmenage ou d'une frustration quelconque. Ils ne deviennent pas la cible de distractions et ils exécutent leur tâche de manière consistante.

Ils sont faciles à reproduire pour la distribution. Une fois qu'ils ont été conçus on peut les déployer sur un bon nombre d'endroits pour différents usages. Ceci peut améliorer dramatiquement la productivité des employés et augmenter les retours sur les investissements.

Ils peuvent donner des conseils lorsqu'un expert humain n'est pas disponible. Ils sont disponibles 24 heures sur 24. Ils ne quittent pas ou ne demandent pas des hausses de salaire, ils ne tombent pas malades et ne prennent pas des journées de congé. Les pertes de temps qui sont parfois occasionnées volontairement chez les êtres humains sont ainsi éliminées d'une bonne manière.

La formation. Les systèmes experts peuvent remplir la tâche d'outil de formation grâce à leur capacité de pouvoir expliquer la démarche suivie dans leur raisonnement. Les non experts peuvent améliorer et tester leurs performances par le biais des consultations. Les utilisateurs peuvent apprendre en demandant pourquoi et comment.

La standardisation de la solution des problèmes. En général les experts n'utilisent pas tous les mêmes approches dans la résolution des problèmes, ce qui conduit parfois à l'inefficacité et au conflit. Un système expert qui utilise des connaissances diverses peut arriver à concilier les différentes méthodes d'exécution et à en créer un standard. Chose souhaitable dans des secteurs tels que le traitement des données, la comptabilité et autres où la nature technique du travail exige une standardisation [2]. Mise à part l'approche de substitution et autres, un but précis dans l'utilisation des systèmes experts est celui d'optimiser la façon de procéder dans la plupart de secteurs où une bonne gestion et une bonne disponibilité de l'information sont essentiels. Jusqu'à présent la liste n'est pas exhaustive et elle n'exclut pas non plus les différentes applications en électrothermie. Pour faire une classification caractéristique des systèmes experts, du point de vue environnement théorique de programmation, les systèmes existants peuvent être divisés en trois

groupes principaux: les systèmes qui se basent sur les règles, les systèmes orientés sur les objets et les systèmes hybrides qui opèrent sur les deux méthodes à la fois.

1.3 Structure de base des systèmes experts

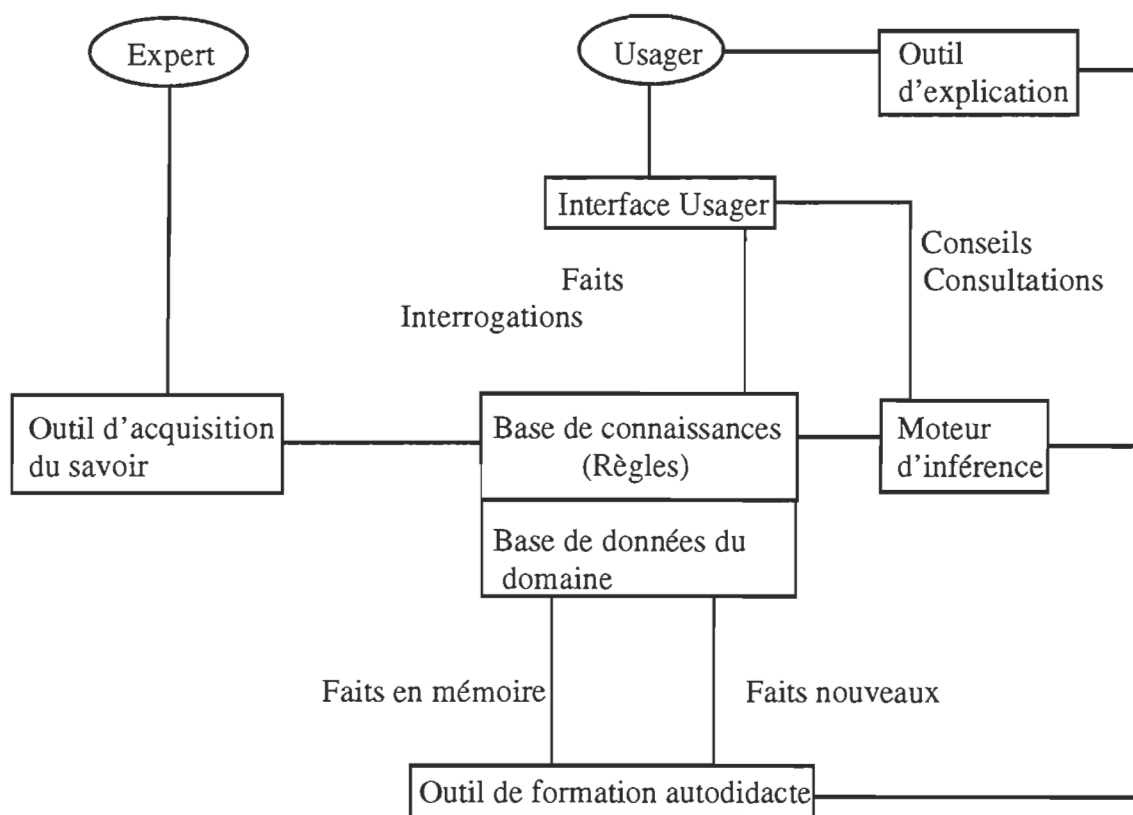


Figure 1.1 Architecture classique d'un système expert. [1]

Depuis leur apparition, les systèmes experts ont été construits de manières distinctes. Les différentes architectures existantes incluent des composantes différentes également. Toutefois certaines composantes sont communes à la plupart des systèmes, à savoir:

une base de connaissances.

un mécanisme d'inférence.

une interface usager.

un outil d'acquisition de connaissances.

un outil de formation autodidacte.

un outil d'explication.

Chaque composante peut être conçue de différentes manières. Une interface usager par exemple peut faire appel à l'utilisation de menus, de fenêtres de dialogue, de graphiques et tout autre forme de transmission de données. L'architecture des systèmes est un exemple de comment les systèmes experts sont en train d'être développés aujourd'hui, et une telle approche n'est qu'à ses débuts, car bon nombre de variations de ces composantes de base sont en train d'être développées à l'instant même, pour mieux arriver à représenter la connaissance et mieux exécuter la difficile tâche de prise de décision à l'aide d'un ordinateur.

La classification des systèmes experts par rapport à leurs environnements de programmation se fait en tenant compte de deux aspects: le type d'application pour lesquelles ils ont été développés et leur convivialité. Du point de vue des applications il existe trois types de systèmes:

ceux qui ont été conçus pour les applications en temps réel

ceux qui ont été conçus pour les applications commerciales

ceux qui ont été conçus pour les applications génériques

Les systèmes conçus pour des applications en temps réel possèdent des interfaces appropriées pour lire, traiter et représenter des données qui parviennent des différents sources dans un contexte réel (capteurs, systèmes d'acquisition de données etc.). Il va de soi qu'ils doivent être suffisamment rapides pour respecter les contraintes en termes de temps qui leur sont imposées. Les systèmes dans les applications commerciales, quant à eux, possèdent des interfaces qui communiquent avec des applications commerciales existantes, comme c'est le cas des bases

de données et les langages utilisés dans les applications de ce genre. Leur tâche principale consiste à représenter les données dans le format requis. Finalement, les systèmes développés pour les applications génériques sont utiles pour n'importe quel type d'application. Ils sont alors en mesure de représenter n'importe quel type de connaissances et ils possèdent à la fois les mécanismes nécessaires pour faciliter la programmation d'interfaces avec d'autres types de d'applications, c'est à dire des langages de programmation, des bases de données et d'autres types de logiciels.

La convivialité est une propriété importante pour tout système. En général, la facilité d'utilisation pour l'utilisateur se traduit par une grande aisance dans le développement des applications (interfaces usager, interfaçage avec d'autres programmes etc.) et aussi par des résultats optimaux plus attrayants et plus puissants [10].

Le langage LISP (list programming) et PROLOG (programming logic) sont les plus populaires dans le développement des systèmes experts. Ils manipulent tous les deux des objets. Un des points forts du langage LISP est son environnement compréhensif, dont il en existe plusieurs versions. Ces environnements comprennent des outils pour assister les programmeurs dans des tâches reliées aux graphiques, à la manipulation et à la gestion de données et à l'utilisation d'une souris ou un télécype d'impression.

Certains environnements de programmation conçus pour les systèmes experts permettent de transférer les développements en systèmes experts dans des environnements qui n'ont pas été conçus pour des applications en intelligence artificielle, tels que les microprocesseurs où la logique de système expert est chargée dans un EPROM. Des tels environnements permettent aussi de transférer les développements vers des langages de procédure tels que C ou ADA. Les langages de programmation des environnements de transfert demeurent LISP et PROLOG la plupart du temps [5].

Les systèmes de développement ou coquilles possèdent plusieurs mécanismes d'inférence intégrés dans un moteur d'inférence, le squelette d'une base de connaissances et les outils nécessaires à la gestion de l'information et des ressources. Quelques fois ces systèmes possèdent aussi des facilités d'interface pour raccorder des logiques de programmation qui sont propres à d'autres langages. Il existe alors des systèmes de développement conçus pour fonctionner sur des microprocesseurs, des mini-ordinateurs et des 'mainframes. Tous ces systèmes roulent sur des machines conventionnelles conçues sur le principe d'architecture de Von Neuman ou plus précisément sur le principe du traitement séquentiel.

1.3.1 La base de connaissances

Une base de connaissance en principe contient sous une forme codée, le savoir faire de haut niveau d'un expert sur un sujet en particulier. Une telle codification doit être nécessairement facile à lire et à comprendre. Le savoir est donc obtenu à partir d'un ou plusieurs experts et il est emmagasiné sous forme de données inhérentes à la conception du système pour lequel il a été conçu. L'ensemble de ces données peut se répartir en deux grands volets. Le premier, une base de données relatives à un domaine précis à l'intérieur de laquelle on retrouve des faits, le deuxième, une base de connaissances sous forme de règles relatives à l'état ou le comportement d'un objet en particulier.

Exemple de fait: " la température d'opération du moteur est très haute".

Exemple de règle: SI la protection de distance d'un départ de linge envoie un
 ODP (ordre de déclenchement par phase) sur deux phases seulement
 ALORS le fonctionnement de la protection est anormal.

Il est donc important de faire la différence entre une base de connaissance et une base de données, car les deux demeurent distinctes. Une base de données requiert l'existence d'une sémantique pour l'interprétation de son contenu et elle est regardée comme une large structure de données qui permet l'emmagasiner et l'accès d'une façon efficace. À un plus haut niveau d'abstraction, nous retrouvons la base des connaissances qu'en elle même requiert une théorie de calcul pour son implantation efficace dans une machine conventionnelle [3]. Cette dernière, à l'opposé de la base de données qui contient du savoir concret, contient du savoir abstrait, soit sous forme de relations, attributs etc.. Nous pouvons donc avancer que " le courant de ligne est de 50 A. " est essentiellement une donnée et que le courant de ligne est $\sqrt{3}$ fois le courant de phase (configuration Δ) est du savoir à son tour.

En résumé, une base de connaissances peut contenir du savoir sous forme de diagnostics et d'autres bases peuvent contenir à la fois du savoir diagnostique et du savoir symptomatique. Dans d'autres situations nous pouvons aussi y retrouver du savoir sous forme de graphiques [4] et tout particulièrement sous forme de cas. Voici quelques exemples du type de données qu'une base de connaissances peut emmagasiner:

Types de données:

Des noms: CONVECTION, IEEE, F-18.

Des chaînes de caractères: Une séquence de caractères délimités par des guillemets. La manipulation des chaînes de caractères se fait par des opérateurs tels que la concaténation.

Des nombres simples: Des entiers ou des réels sans unités ou étiquettes.

5, 3.1416.

Le constantes d'unités: Un nombre suivi d'une unité composite de mesure, lequel peut être combiné par la multiplication la division ou le calcul exponentiel.

200 W/mm, 55 degrés °C.

Les constantes étiquetées: Un nombre avec un préfixe arbitraire appelé étiquette.

Facteur de convection 111.8

Temps de montée 15

Des unités qui combine une liste d'éléments dans une structure simple.

matrice [2 -3j 1] , [4j 1 -5] , [3 5 8].

Une classe d'éléments qui spécifie un ensemble d'éléments qui appartiennent à la classe.

Un câble.

Un câble de haute tension qui est aérien.

Un câble sous-marin en fibre optique.

Un patron: Structure conçue pour les entrées et sorties et les opérations de jumelage.

*.vhdl

1.3.2 L'interface usager

L'interface usager en soit est une implantation logicielle visant à établir le protocole de communication entre le système expert et l'utilisateur de ce dernier. Par le biais de cet interface, l'utilisateur peut transmettre des faits inhérents au domaine d'application pour lequel le système a été conçu et il peut à la fois poser des questions au sujet du champ d'intérêt pertinent. Quelques versions de système expert font l'acquisition du savoir à l'aide de l'interface usager, laquelle à la fois procure les outils nécessaires pour obtenir des réponses. Une telle variante d'interface usager prend le nom d'outil d'acquisition de savoir. Pour garder la trace des conseils et des consultations réalisées ainsi que des raisonnements suivis par le moteur d'inférence on fait appel à un outil d'explication. De cette manière, on peut interroger le système à n'importe quel moment du dialogue interactif, sur le cheminement suivi pour arriver à une conclusion. En dernier lieu, l'interface usager peut comprendre un outil de formation autodidacte. Il a comme rôle d'accepter les faits que le moteur d'inférence a développé et de les comparer avec ceux qui sont placés en mémoire dans la base de données du système. Si le nouveau fait ne s'y trouve pas, il peut être rajouté si l'utilisateur le décide, toutefois l'outil de formation tentera en principe de s'assurer que

le fait soit compatible avec le domaine d'expertise pour lequel le système a été conçu [1]. Tel que mentionné au début du texte l'interface usager peut prendre des formes aussi diverses que les menus, les fenêtres de dialogue interactifs, graphiques, bouton poussoir et autres.

1.3.3. Le moteur d'inférence

Interpréteur des règles, moniteur ou mécanisme d'inférence, celui-ci est la composante active d'un système expert. Il sélectionne des règles à partir de la base des connaissances et exécute les actions qui leur sont associées. Ce qu'en termes plus précis on nomme "déclencher" une règle. Deux facteurs essentiels distinguent les règles des énoncés conventionnels:

1. L'énoncé conditionnel est exprimé sous forme de patron plutôt que sous forme d'expression booléenne.
2. Le contrôle d'exécution n'est pas donné d'une règle à la suivante dans une séquence lexicale, il est avant tout déterminé par le moteur d'inférence complètement à part [5].

Donc une fois que le savoir a été représenté sous une forme quelconque, il est nécessaire d'avoir une procédure de raisonnement pour pouvoir tirer des conclusions à partir de la base des connaissances lorsqu'on aborde le paradigme de résolution de problème. Deux méthodes de contrôle et d'organisation sont alors prévues dans la recherche d'une solution. Celles-ci impliquent le chaînage des règles SI ALORS pour définir une suite logique de raisonnement des façons suivantes:

chaînage inverse

chaînage direct

Dans le chaînage inverse le moteur d'inférence remonte à partir d'un ensemble de faits ou de buts pour vérifier s'il y a des antécédents qui conduisent à de tels faits ou de tels buts. En d'autres mots, nous sommes en face ou nous voulons atteindre une conclusion et le cheminement à suivre pour arriver à cette conclusion n'est pas connu ou confirmé. On peut partir du fait ou but

suyvant (panne_de_courant), les antécédents qui vont confirmer ou conduire au but peuvent être par exemple que (problème_de _réseau) et que (ouverture_du _disjoncteur_de _protection) soient vrais. Le premier fait est confirmé si on trouve que d'autres maisons autour n'ont pas d'électricité, le second fait est confirmé si non. On fait alors un chaînage à partir d'une hypothèse (panne_de_courant) jusqu'à l'évidence d'autres faits tels que (d'autres_maisons_ont du_courant) etc.. Dans une telle procédure d'inférence l'utilisateur doit énoncer toute l'information pertinente sous forme de faits ou de confirmation de faits avant que le but ou la confirmation du but soient atteints.

Dans le chaînage direct on raisonne dans la direction opposée, en partant du SI pour en arriver au ALORS. Nous partons d'un ensemble de conditions pour arriver à une conclusion. Nous ne partons pas d'une hypothèse mais plutôt d'un fait confirmé. Une fois que nous avons confirmé que d'autre maisons autour n'ont pas de courant et que le sectionneur d'entrée est fermé, nous pouvons inférer qu'il y a problème sur le réseau.

1.4 Principes théoriques de fonctionnement des systèmes experts

Pour faire une classification caractéristique des systèmes experts, du point de vue environnement théorique de programmation, les systèmes existants peuvent être divisés en trois groupes principaux: les systèmes qui se basent sur les règles, les systèmes orientés sur les objets et les systèmes hybrides qui opèrent sur les deux méthodes à la fois.

1.4.1. Les systèmes experts orientés sur les objets

Le paradigme de programmation orientée objets est une sorte de simulation. Un programme dans ce paradigme est énoncé en termes d'objets qui s'envoient des messages entr'eux, et ceci représente la seule façon dont les objets peuvent interagir avec le monde externe au système expert. L'envoi d'un message peut être fait directement par une instruction, ou de façon indirecte en envoyant un message lorsque la valeur de l'objet change, principe à partir

duquel on définit la notion de démon (Programme qu'on appelle pour accomplir des actions lorsqu'un événement a lieu).

Un objet répond alors à un message en exécutant une des procédures de l'objet, aussi le message détermine quelle méthode doit être exécutée. Chaque objet possède alors sa propre mémoire et procédure. Dans cet amalgame, nous retrouvons des entités (des données) et des opérations (méthodes) pertinentes à l'objet lui-même. Un objet peut aussi hériter une méthode d'un autre objet, ceci est similaire au mécanisme d'héritage associé à la représentation des faits par un cadre. Dans une telle représentation, les faits sont groupés autour des objets. Un cadre est alors une structure de données dont les composantes sont appelées des attributs. Les attributs ont des noms et peuvent avoir des valeurs de plusieurs types. Tels que des valeurs booléennes, des chaînes de caractères, des références sur d'autres cadres et même des procédures ou méthodes qui peuvent servir à calculer la valeur d'un champ à partir d'autres informations. Avec une telle structure on ne tente pas toutefois de représenter la connaissance comme étant une collection de fragments simples séparés, mais plutôt comme une collection de cadres reliés ensembles par le partage en commun des diverses fentes, et c'est par le biais de ce partage que les cadres de bas niveau héritent les propriétés des cadres d'un plus haut niveau [6].

Rotor	
Atributs	Valeur
Type de moteur	À cage
Nombre de barres	44
Angle d'inclinaison	40 degrés
Materiel	Aluminium
No. de référence	Si requis consulter la base de données A8

Figure 1.2 Représentation d'un rotor à cage sous forme de cadre. [1]

De façon générale dans les systèmes experts orientés par objets:

1. Il est permis d'assigner des valeurs aux variables d'instance (ou fentes) d'un objet sans avoir à passer par la manipulation de messages.
2. On exploite le concept d'héritage pour exprimer les attributs communs et accroître la réutilisation. Par exemple, lorsque deux objets ont quelque chose en commun, on peut considérer de créer une classe d'objets de plus haut niveau par l'entremise de l'héritage de définitions communes.
3. On crée des nouvelles classes d'objets pour souligner des différences importantes à la place d'augmenter les définitions d'une classe existante.
4. On évite des définitions d'objet qui ne sont pas nécessaires; lorsqu'une classe d'objets possède seulement une ramification qui hérite de cette classe, on peut fusionner la classe d'objet de ramification à la classe parent [5].

Dans le cas de LEVEL5 OBJECT les objets sont représentés sous formes de classes qui possèdent des attributs des types suivants:

SIMPLE: vrai ou faux

STRING: chaîne de caractères

NUMERIC: numérique

COMPOUND: attribut qui peut prendre plusieurs valeurs

MULTICOMPOUND: attribut qui dont les valeurs peuvent être du type COMPOUND.

PICTURE: image

TIME: temps

INTERVAL: intervalle de temps

RECTANGLE: rectangle définit par des coordonnées

La valeur de ces différents attributs peut être assignée par des méthodes **WHEN NEEDED** et **WHEN CHANGED**, par des **DAEMONS** (demons) et par des **RULES** (règles).

1.4.1. Les systèmes experts basés sur les règles

En principe, presque tout formalisme dans lequel on peut exprimer le savoir sur un domaine en particulier, peut être considéré utile dans un système expert. Toutefois le langage des règles SI ALORS, appelé aussi des règles de production, est en quelque sorte le formalisme le plus populaire dans la représentation du savoir. De façon générale, de telles règles sont des énoncés conditionnels, mais aussi elles peuvent avoir plusieurs interprétations comme par exemple:

SI condition A ALORS conclusion B

SI situation S ALORS action T

SI conditions C1 et C2 vraies ALORS condition C pas vraie.

Les règles SI ALORS sont une forme de représentation naturelle du savoir et elles ont les caractéristiques suivantes:

- **Modularité:** Chaque règle définit une petite partie relativement indépendante du savoir.
- **Incrémentabilité:** Des nouvelles règles peuvent être rajoutées à la base de connaissances indépendamment des autres règles.
- **Elles servent de support à la transparence du système.**

Cette dernière propriété se traduit par l'habilité d'un système de pouvoir expliquer ses décisions et solutions. Les règles SI ALORS facilitent la réponse au type suivant de question qu'un usager peut poser:

1. Comment avez vous tiré cette conclusion ?
2. Pourquoi êtes vous-intéressé par cette information ?

Le principe de fonctionnement d'un système basé sur les règles peut s'illustrer de la façon suivante [7]:

SI la protection de distance d'un départ de ligne envoie
un ODP (ordre de déclenchement par phase) sur deux phases seulement,

ALORS

action 1: conclure que le fonctionnement de la protection
est anormal.

action 2: impression d'un message signalant l'anomalie.

action 3: explication de niveau 1:
l'ouverture d'un disjoncteur ne peut se faire
que sur une des trois phases.

action 4: explication de niveau 2:
une ouverture sur deux phases signifie
probablement que le défaut est polyphasé
est que la protection a mal fonctionné sur une
phase.

Dans la recherche d'une solution, les systèmes experts basés sur les règles font appel au principe de chaînage direct et du chaînage inverse des règles contenues dans la base des connaissances pour implanter une stratégie de raisonnement. Certains systèmes peuvent accommoder les deux stratégies de raisonnement à la fois et dans d'autres scénarios l'écoulement d'un intervalle de temps peut motiver l'application d'un raisonnement en particulier. Le raisonnement hypothétique et le raisonnement par cas font aussi partie du répertoire. Tel que mentionné à la page 5 une base de connaissances peut des fois contenir en mémoire un éventail de cas. Choix judicieux qui s'avère parfois nécessaire lorsqu'on n'arrive pas à représenter le savoir sous la forme d'un paquet de règles [8]. La stratégie de recherche de solution peut prendre des

noms aussi divers que la recherche topographique et la recherche symptomatique. La recherche topographique utilise le modèle normal du système pour sélectionner le prochain champ d'intérêt. Chaque champ est alors jugé comme étant bon ou mauvais par le biais d'observations appropriées. Le champ suivant d'intérêt peut être, soit une dérivation du champ courant, soit un champ du même niveau physiquement ou logiquement adjacente. L'avantage de la recherche adjacent réside dans le fait qu'elle dépende du fonctionnement normal d'un système plutôt que de son mauvais fonctionnement. Toutefois l'utilisation de l'information disponible par le biais de la recherche topographique n'est pas rentable à cause du fait que les observations sont utilisées pour faire des bons ou des mauvais jugements. Dans un tel contexte la recherche topographique peut ne pas conduire vers un diagnostic. Dans le cas de la recherche symptomatique, la recherche d'une solution se fait dans une librairie de modèles de symptômes pour en trouver un qui corresponde aux symptômes observés. L'état du système associé avec le modèle de symptôme est ainsi identifié. Lorsqu'il survient des ambiguïtés, d'autres observations sont requises pour atteindre une solution. La recherche symptomatique est plus compliquée, une fois que la dynamique du système et la simulation d'une défaillance sont requises en principe, ce qui exige plus de mémoire et des étapes de gestion de cette dernière par rapport à la recherche topographique [9].

Les applications les plus simples offrent un choix fixe de stratégie. Les applications plus flexibles permettent au programmeur de définir sa propre stratégie.

Pour en conclure sur les systèmes basés sur les règles (ou systèmes de production) on peut citer quelques uns de leurs désavantages:

1. Pour chaque règle à utiliser et son contexte d'application, il doit exister de l'information emmagasinée quelque part. Le contrôle efficace du grand nombre d'antécédents qu'une ou des règles puissent contenir, n'est souvent pas facile.
2. Les ensembles de règles n'ont pas une structure intrinsèque, ce qui a comme effet de rendre la gestion des grosses bases de connaissances assez ardue.

3. On ne peut pas représenter toutes les méthodes de résolution humaine sous forme de méthode de production.
4. Le processus de jumelage-sélection-déclenchement est inefficace de manière inhérente dans les étapes de calcul conventionnel.
5. A cause de l'indépendance qui existe entre les règles du point de vue de stratégie de contrôle il est impossible de déterminer de façon rigoureuse les propriétés d'un système à partir d'une analyse statique. Il est nécessaire de tester le système avec des données appropriées pour savoir ce qu'il fera. Une fois que les systèmes de production ne peuvent être testés de manière exhaustive, il ne peuvent être utilisés dans des applications critiques de sécurité [6] .

1.5. Outils disponibles pour la création des systèmes experts

Une vaste gamme d'outils et de langages de programmation sont disponibles pour un bon nombre d'applications qui peuvent être écrites soit complètement ou partiellement autant dans un système de développement que dans un langage de programmation. Dans cet éventail d'outils nous pouvons distinguer les types suivants:

Outils de design

- Outils de création de prototypes
- Éditeurs

Outils d'acquisition

- Éditeurs
- Outils d'induction
- Des fenêtres graphiques et des écrans à menus

Outils de conception

- Compilateurs
- Interfaces de bases de données
- Interfaces de langages de programmation

- Éditeurs graphiques
- Générateurs de menus
- Éditeurs de texte
- Interpréteurs

Outils de raffinement

- Éditeurs
- DéTECTEURS d'erreurs
- Estimateurs de processus de raisonnement
- Vérificateurs de consistance
- Vérificateurs de syntaxe
- Facilités d'explication et d'aide continue.

Les particularités de chaque outil dépendent de la structure dans laquelle les différentes coquilles ont été développées et les considérations de leurs concepteurs. Les tableaux de la page suivante donnent un aperçu des systèmes de développement et des langages de programmation qui ont servi jusqu'à présent au développement de quelques outils propres à la conception des systèmes experts.

Tableau 1.1 Outils utilisés pour le développement de systèmes experts

Outils Orientées sur les objets	Outils Basées sur les règles	Outils Hybrides
LEVEL5	OPS5	KEE
EUREKA	OPS83	NEXPERT
DELFO-2	G2	ART
ENVISAGE		GOLDWORKS
RELSHELL		KNOWLEDGE CRAFT
KNOWLEDGE PRO		KES
TSES		SNAP
MELDASH		
IREX(Toshiba)		
BRAINS		

Tableau 1.2 Langages de programmation utilisés pour le développement de systèmes experts

Logiques	Orientés sur les objets	Procédure
PROLOG	C++	C
LISP	SMALLTALK 80	PASCAL
	ADA	FORTTRAN

1.6 Domaines d'application des systèmes experts

Il existe un immense éventail de tâches techniques qui requièrent l'application d'un bon nombre de connaissances que la plupart des gens ne possèdent pas. Ces tâches en général peuvent être accomplies par des experts qui ont accumulé les connaissances requises. Pour élaborer davantage sur les différentes applications de l'intelligence artificielle dans les systèmes de puissance, il vaut la peine de mentionner que depuis le milieu des années 80, un bon nombre de différentes méthodologies ont fait leur apparition pour aider les gens en puissance à résoudre les divers problèmes habituels. On a ainsi réussi à créer des nouveaux outils pour des applications qui en possédaient aucun en pratique, comme par exemple pour la localisation de défauts, le traitement de signaux d'alarme et la restauration automatique. Dans d'autres cas, en se basant sur l'expérience passée et le raisonnement logique, les systèmes experts font la concurrence à certains outils numériques connus tels que la commutation des réseaux et la prédiction de la consommation. Dans de plus récentes applications, les systèmes experts sont en mesure de fournir une logique de contrôle capable d'intégrer l'acquisition de données en temps réel, des algorithmes numériques nécessaires pour l'analyse de l'écoulement de puissance, de la stabilité, de la fiabilité etc. et l'expertise requise dans le traitement et l'interprétation de l'information. Pour faire un résumé des différentes applications des systèmes experts dans les domaines de puissance, on peut se référer plus bas comme suit [10]:

Applications en systèmes de puissance: Traitement des signaux d'alarme, distribution, opérations, protection, sécurité, contrôle, test des équipements, entretien, entraînement des opérateurs, fiabilité, diagnostique, analyse de défauts, commutation des réseaux, planification, restauration, contrôle de tension.

Applications en distribution: Automatisation, design, surveillance de sous-station, localisation de condensateurs, configuration de circuit d'alimentation, allocation de charge, contrôle de sous-station, opération des condensateurs, design de sous-station, support logistique de sous-station.

Applications en planification: Prédiction de la consommation, gestion, gestion des projets, génération, transmission, coordination de l'isolation, planification des opérations.

Applications en opérations: analyse de congestion, organisation de la génération commutation optimale, prédiction de la consommation, planification des opérations environnement, contrôle de la fréquence de charge, organisation des opérations.

Applications systèmes de sécurité en puissance: Sécurité dynamique, contrôle des situations de panique, surcharge des lignes, contrôle des dégâts.

Ces différentes applications sont écrites soit partiellement ou complètement dans un système de développement et complètement dans un langage de programmation et les différents systèmes experts conçus à cet effet sont soit orientés sur les objets, basés sur les règles ou hybrides.

1.6.1 Exemple d'application de systèmes experts

Les machines électriques, comme on le sait, jouent un rôle très important dans la génération de la puissance pour toutes les applications industrielles et domestiques. En autant que les machines soient entretenues proprement, une défaillance quelconque peut être vue comme une exception plutôt qu'une règle. Toutefois, les pannes ne sont pas inévitables et lorsqu'elles surviennent il est essentiel de les localiser et avoir à disposition les moyens nécessaires pour la réparation dans le meilleur délai. Quelques pannes peuvent être évidentes mais la majorité requière une recherche détaillée pour identifier la cause et la nature des dommages. Pour donner un exemple de système expert tel que décrit dans [11] nous abordons la configuration de base du système expert PROMITHEAS tel que décrite par les auteurs. Ce système a été conçu pour traiter les problèmes des pannes dans les machines électriques.

La base de connaissances a été conçue d'après la structure d'arbre en deux branches principales. La première branche contient le savoir pertinent à la détection de défaut et sa réparation pour un type de machine spécifique:

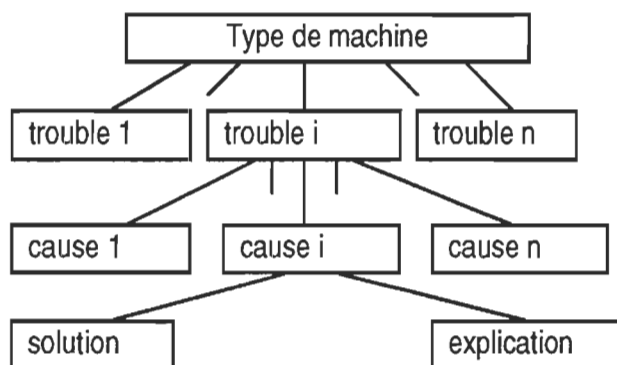


Figure 1.3 Représentation de la structure de la base des connaissances de PROMITHEAS .[11]

La première branche consiste alors en trois groupes de sous-branches:

- Le premier contient les types de machines disponibles sur le système.
- Le second contient les sortes de troubles détectés et enregistrés pour un type de machine en particulier.
- Le troisième contient les causes et solutions pour chaque trouble en plus d'une explication pertinente.

Dans la deuxième branche nous retrouvons le savoir concernant le programme d'entretien propre à chaque machine répertoriée, lequel peut s'illustrer comme suit:

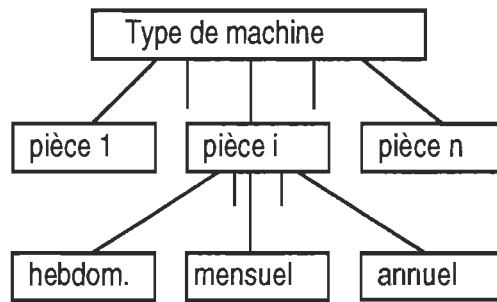


Figure 1.4 Représentation du programme d'entretien de PROMITHEAS. [11]

Tel que montré, trois sous-groupes composent également ce volet:

- Le premier comprend les machines électriques disponibles dans le système.
- Le second comprend les différents types de pièces des machines.
- Le troisième comprend les trois différents types d'entretien prévus pour les machines. Il décrit ce qui doit être fait à chaque semaine, à chaque mois et à chaque année pour garder les machines en bon état de fonctionnement.

Ce système expert a été écrit en Turbo-Prolog lequel a une structure interne qui permet de créer une base de données et qui contient à la fois un moteur d'inférence prêt à être utilisé. Ce dernier agit sur les faits et construit ou tire des conclusions logiques. Turbo-Prolog utilise en plus le mécanisme de chaînage inverse comme stratégie de raisonnement, il possède également une méthode facile de représentation en arborescence et de manipulation des listes chaînées.

Dans le processus d'acquisition du savoir deux sources principales sont mises à profit à part de celle reliée aux expert humains:

- Des données accumulées à travers les années.
- Les "Handbooks" d'entretien et les chartes de troubles possibles.
- Lorsque sollicité, le système expert se présente comme suit:

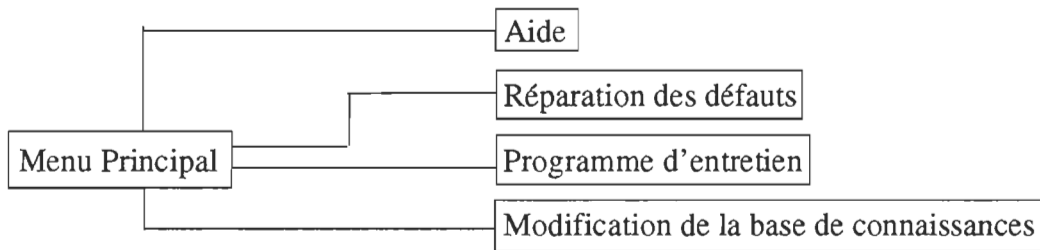


Figure 1. 5. Présentation du menu du système PROMITHEAS [11]

Le volet Réparation des défauts se présente comme suit :

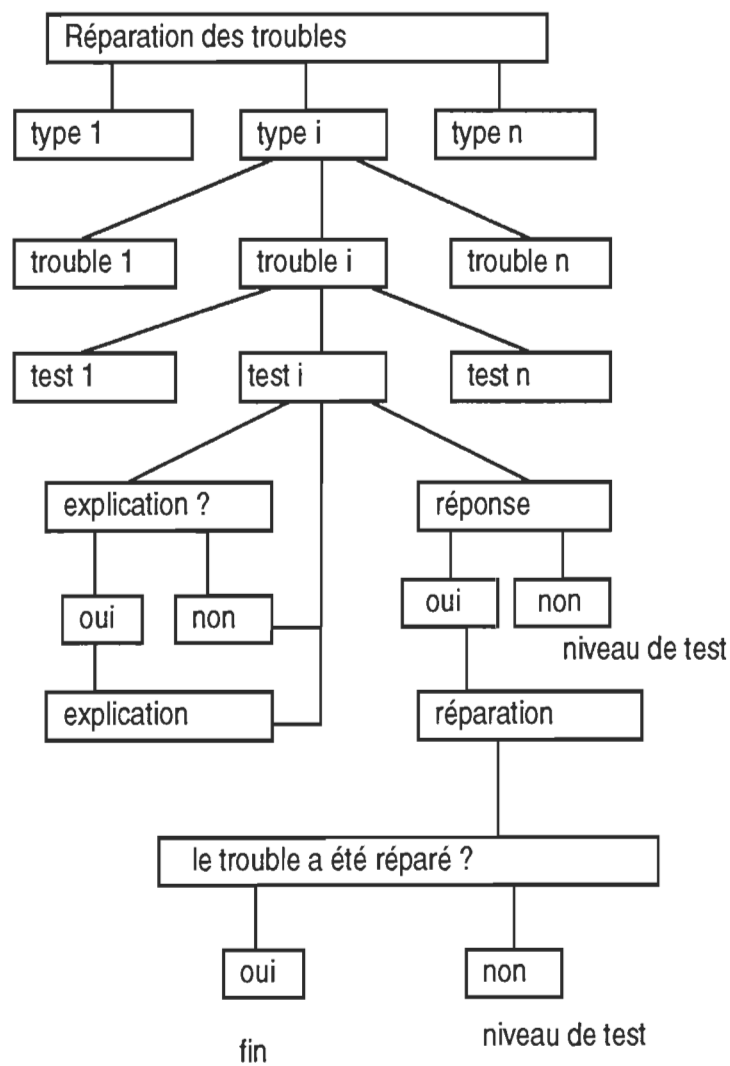


Figure 1.6 Arborescence de réparation de PROMITHEAS. [11]

Le programme d'entretien se présente comme suit:

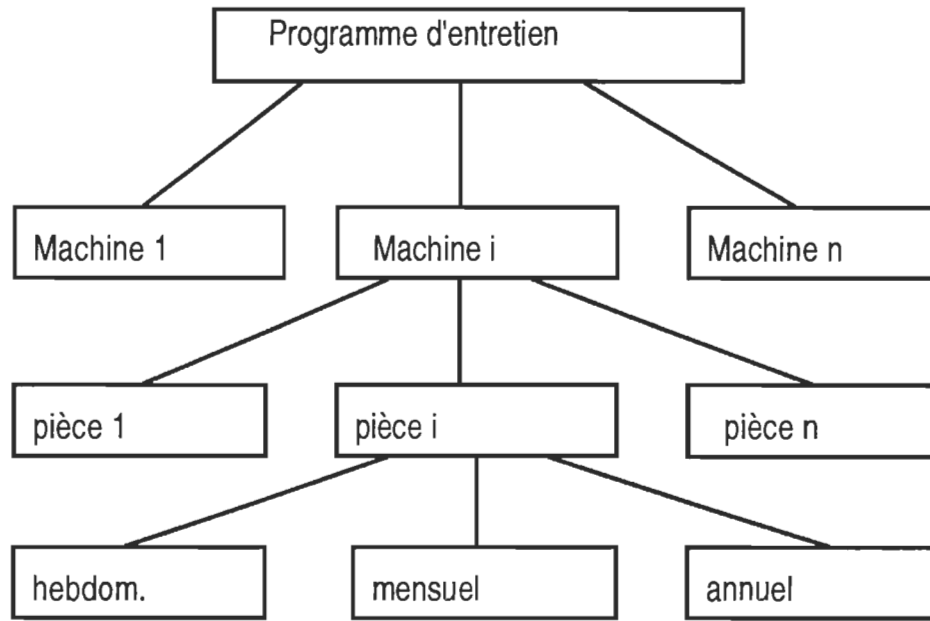


Figure 1.7 Arborescence du programme d'entretien de PROMITHEAS.[11]

Pour l'application des règles concernant la localisation et la réparation des défauts on associe des poids de pondération tels que 0,1,2,3. Lesquels représentent à leur tour des priorités: pas de priorité, basse priorité, haute priorité, très haute priorité. De cette façon en comparant les poids le système peut extraire à chaque étape la règle à appliquer pour prendre une décision. Pour enclencher une modification au niveau de la base de connaissances, l'utilisateur a l'option de pouvoir rajouter, enlever et éditer une arborescence. Par la suite toutes les règles de procédure de manipulation de structure d'arbre s'appliquent aux trois volets contenus dans le menu principal.

Pour illustrer l'application de ce système expert on peut considérer le cas d'un moteur à cage lequel après une longue période de fonctionnement travaille à une température plus haute que la normale.

Le système présente alors à l'utilisateur le menu suivant:

NIVEAU : TYPE DE MACHINE

PROMITHEAS/N.T.U.A

****SÉLECTIONNEZ LE TYPE DE MACHINE****

	-GÉNÉRATRICE C.A.
	-GÉNÉRATRICE C.C.
TYPE DE MACHINE	-MOTEUR C.C
	-MOTEUR À CAGE
	-MOTEUR BOBINÉ
	-MOTEUR MONOPHASÉ

En utilisant un curseur l'usager choisit l'option qui l'intéresse et il fait par la suite un retour de chariot. Un nouveau menu en arborescence apparaît à l'écran:

NIVEAU: LISTE DE DÉFAUTS

PROMITHEAS/N.T.U.A/MOTEUR À CAGE

****SÉLECTIONNER LE TROUBLE SUR LA MACHINE****

TROUBLE

- LE MOTEUR NE PART PAS
- TEMPÉRATURE D'OPÉRATION TRÈS HAUTE
- DU BRUIT DANS LE MOTEUR
- L'ESSIEU EST TRÈS CHAUD
- LES COUSSINETS SONT CHAUDS

En supposant que la sélection se fasse sur TEMPÉRATURE D'OPÉRATION TRÈS HAUTE, le système enclenche un processus d'interrogation pour essayer d'isoler la cause et en faire une recommandation adéquate:

***** TEST*****

Est-ce que le moteur est surchargé OUI
 NON

Si l'usager répond oui le système suggère la solution adéquate

***** SOLUTION*****

Mesurez la charge sur le moteur. Réduisez la charge

Car il est possible que le trouble ait plus qu'une cause.

*** EST-CE QUE LE TROUBLE A ÉTÉ RÉPARÉ ***

OUI
 NON

Si la réponse est non le système continue à faire des tests. Si la réponse est oui, le système affiche alors:

******LE TROUBLE A ÉTÉ RÉPARÉ******

CHAPITRE II

LES SYSTÈMES EXPERTS EN ÉLECTROTHERMIE

2.1 Généralités

Jusqu'à présent presque aucune publication fait mention de l'existence d'un système expert en électrothermie. La compagnie Mentor Graphics distribue toutefois deux logiciels d'analyse thermique appelés AUTOFLOW et AUTOHTERM lesquels ont été conçus pour étudier le comportement thermique des circuits imprimés. Les logiciels en tant que tels possèdent quelques caractéristiques particulières aux systèmes experts, ils sont dotés d'un outil de documentation automatisé pour assister les utilisateurs lors de l'analyse et la modélisation de problèmes. De la même façon les logiciels utilisent des interfaces graphiques propres aux systèmes de développement commerciaux existants sur le marché actuel. La programmation interne de tels logiciels est en grande partie symbolique également. Ce sont les codes numériques les plus intelligents qui existent en ce moment, mais pour le faire opérer il est nécessaire d'avoir une certaine expérience dans le domaine thermique. Le système expert que l'on veut développer est un peu différent et beaucoup plus complet.

2.2 Cycle de vie d'un système expert en électrothermie

Donc avant de parler de systèmes experts en électrothermie, il est nécessaire de parler de la notion de cycle de vie du système qu'on tente de développer. Un tel cadre conceptuel est d'une grande utilité pour la planification et la mise en marche d'un projet de développement d'un nouveau logiciel. On divise alors le paradigme de cycle de vie d'un système expert en quatre volets principaux.

A CONCEPTUALISATION DU SYSTÈME

1. Le concept associé au système.
2. L'étude de faisabilité du système.
3. Définition des critères préliminaires.
4. Analyse des critères préliminaires.

B LA SÉLECTION D'OUTILS

5. Outils disponibles pour l'analyse.
6. Sélection des outils pour le projet.

C LE PROTOTYPE

7. Développement du prototype.
8. Documentation du prototype.
9. Formation de l'utilisateur sur le prototype.
10. Utilisation du prototype.
11. Acceptation du prototype.

D PRODUCTION FINALE DU SYSTÈME

12. Présentation et configuration du produit fini
13. Opération et entretien.

Ces phases du cycle de vie du système à développer sont normalement complétées de façon séquentielle, une phase n'est pas accomplie jusqu'au temps que la phase précédente ait été complétée. En principe toute phase peut être reprise en l'occurrence du fait que des nouvelles informations à son sujet soient disponibles. Il est donc possible de sauter des étapes lorsqu'on fait marche arrière, mais avancer vers le bas se fait toujours de façon séquentielle sans sauter des étapes.

Pendant la première phase le concept de système expert en électrothermie doit être développé, tel que suggéré par Martin et Oxman dans [1], en répondant aux questions suivantes:

-Quel est le problème à résoudre ?

L'électrothermie comme le terme l'indique est le concept le mieux adapté pour pouvoir décrire les multiples façons dont la matière se chauffe par l'action directe ou indirecte de l'énergie électrique. La nécessité d'utiliser d'une façon plus efficace les énergies disponibles est souvent dictée par certaines considérations d'ordre économique et financier qui rendent une technique acceptable ou non sur le plan industriel. L'électrothermie s'avère alors la technique d'aide à la prise de décision pour tous ceux qui interviennent dans la détermination des principes de construction et de fonctionnement des équipements thermiques industriels. Mais au-delà de simples considérations monétaires qui justifient l'utilisation de l'électricité à des fins thermiques dans le processus industriels, l'électrothermie doit toutefois une grande partie de son développement aux caractéristiques spécifiques de cette forme d'énergie:

- la facilité de mesure, de contrôle et de régulation.
- la possibilité de localiser de façon très précise de l'effet thermique.
- le rendement de conversion d'énergie très élevé.
- la facilité d'automatisation et reproductibilité des conditions d'opération.
- la limitation de la pollution et l'amélioration des conditions de travail.

On divise alors les procédés électrothermiques en deux grandes catégories:

Le chauffage indirect où la transmission d'énergie se fait à partir d'une source de chaleur vers un corps à chauffer, phénomène physique qui est régi par les lois usuelles de la thermique.

Dans ce volet nous avons:

- chauffage indirect par résistance
- chauffage par rayonnement infrarouge
- chauffage indirect par arc
- chauffage par plasma

Le chauffage direct où un corps quelconque est parcouru par un courant électrique devenant ainsi le siège d'un dégagement de chaleur dont le transfert s'effectue également selon les lois de la thermique classique. Ce volet inclut:

- chauffage direct par conduction (pertes résistives)
- chauffage par induction électromagnétique
- chauffage diélectrique
 - haute fréquence
 - hyperfréquence (micro-ondes)
- chauffage par bombardement électronique
- chauffage par laser
- chauffage direct par arc

Cette diversité de techniques de base permet de rechercher pour chaque processus industriel envisagé le procédé ou la combinaison de procédés électrothermiques qui s'adaptent le mieux à des besoins spécifiques [14]. Ceci résume en quelque sort le but premier de l'électrothermie, celui de retirer un certain bénéfice de l'utilisation de l'électricité comme source d'énergie. Toutefois, comme cela était mentionné au début, la vocation première du Laboratoire d'électrothermie s'oriente du côté de la résolution des problèmes de design et de diagnostic électrothermique des systèmes qui n'ayant pas été conçus à cet effet, génèrent de la chaleur de façon analogue au chauffage direct. Cette catégorie comprend évidemment les systèmes et les dispositifs électriques et électroniques de presque tous les genres. En résumé le problème à résoudre est fortement lié à l'analyse électrothermique de tels systèmes par des techniques de simulation par éléments finis et par la mesure et l'instrumentation.

-Comment le problème a été résolu auparavant ?

Auparavant ce problème a été résolu en partie à l'aide de formules analytiques, à l'aide de méthodes graphiques et de méthodes empiriques de dimensionnement et à l'aide de l'instrumentation et la mesure non-assistée par ordinateur. Lorsqu'on a commencé à essayer

d'incorporer les méthodes numériques à la résolution du problème, ceci était fait à l'aide de codes peu évolués qui faisaient appel aux méthodes de relaxation et aux différences finies. Les interfaces graphiques et les techniques de DAO n'étaient pas disponibles à l'époque. Le virage technologique des dix dernières années a permis d'améliorer considérablement la pratique de l'analyse électrothermique. Plusieurs codes numériques ont été conçus à cet effet et au même temps on a incorporé la capacité de traitement et de stockage de l'information aux techniques conventionnelles d'instrumentation et mesure.

Lorsque les codes numériques ont été rendus plus perfectionnées les problèmes d'analyse électrothermique ont été résolus par la modélisation approximative à deux et à trois dimensions des géométries à l'étude à l'aide des outils DAO disponibles avec chaque code de simulation. D'autres outils permettaient également de définir des conditions aux frontières par le biais aussi d'interfaces graphiques, de menus et des écrans interactifs. Par la suite à l'aide de processeurs de calculs on faisait appel à la méthode des éléments finis pour résoudre le système d'équations qui définissait le système créé à priori. L'exploitation des résultats était aussi faite à l'aide des interfaces graphiques disponibles avec les systèmes d'ordinateur utilisés.

-Si le problème à résoudre est nouveau en soi quelles solutions peut-on envisager ?

Le problème à résoudre n'est pas nouveau en soi car on s'y intéresse depuis le temps qu'on a commencé à implanter au niveau des industries les principes de construction et de fonctionnement des électrotechnologies et des systèmes électriques et électroniques.

Il est donc important de prévoir à l'avance s'il existe un lien entre la technologie associée à l'intelligence artificielle et le problème à résoudre pour être en mesure de développer un concept de système qui deviendra une solution à retenir. A ce moment-là on doit être en mesure de répondre aux questions suivantes

-En quoi d'autre consiste le problème ?

Le problème à résoudre consiste aussi à raffiner de façon itérative les modèles utilisés pour la simulation des systèmes autant au niveau des paramètres qu'au niveau de la géométrie, ceci dans le but de reproduire des conditions d'opération facilement mesurables. Une telle approche est surtout utile pour l'estimation des paramètres que des fois on ne connaît pas. C'est à ce moment-là qu'il est indispensable d'avoir accès à des mesures thermiques en temps réel pour pouvoir mener à terme une analyse électrothermique. Il va de soi qu'il est préférable d'utiliser des instruments de mesure qui aient la capacité de traiter l'information thermique de façon numérique, tels que les systèmes d'acquisition de données et les cameras infrarouges.

-Comment la technologie des systèmes experts va-t-elle apporter une solution au problème?

La technologie des systèmes experts va apporter une solution au problème par le biais de la création d'une base de connaissances générales en électrothermie à l'aide de laquelle il sera plus facile de traiter et consulter ces informations, comparativement aux démarches habituelles de recherche d'information qui s'avèrent presque toujours longues et infructueuses. D'un autre côté, la technologie des systèmes experts va contribuer à la résolution du problème en permettant aux non-initiés dans le domaine de l'électrothermie d'apprendre et de résoudre des problèmes de ce type sans que la présence physique d'un expert soit requise.

-Qu'est-ce que le système expert est supposé de faire et quels sont les buts à atteindre ?

Le système expert est supposé, en premier lieu, de guider l'utilisateur sur les démarches à prendre pour mener à terme l'analyse électrothermique d'un système quelconque à partir des ressources mises à sa disposition sur place ou ailleurs. En ce qui concerne les ressources du point de vue logiciel, le système va aider l'utilisateur à choisir le code numérique qui convient le mieux au problème à l'étude, tout en lui indiquant

-comment définir la géométrie du problème

-comment modéliser l'échauffement direct dans le système

- comment modéliser les différents modes de transfert de chaleur à l'aide desquels le système est refroidi (convection/radiation)
- comment définir l'ordre de précision dans les résultats à obtenir
- comment mailler la géométrie pour générer des éléments finis, etc.

Les buts à atteindre pour la résolution du problème sont:

- Rendre disponibles à partir de la base des connaissances la plupart des informations nécessaires à la résolution du problème.
- Renseigner l'utilisateur sur la façon de calculer, estimer ou mesurer l'information qui n'est pas disponible dans la base des connaissances.
- Répondre de la meilleure façon possible aux interrogations de l'utilisateur lorsque celui-ci le considère nécessaire.
- Gérer et coordonner les ressources nécessaires à la production de résultats sans que l'utilisateur ait à se soucier des problèmes d'interfaces, compression de données, portabilité etc.
- Réduire le plus possible le temps requis pour compléter les différentes étapes d'analyse, de modélisation et de résolution.
- Permettre à l'utilisateur peu expérimenté d'accomplir une tâche jusqu'ici réservée aux experts dans le domaine de l'électrothermie.

-Comment le système expert va-t-il atteindre de tels buts ?

Le système expert va atteindre de tels buts par la compilation dans la base des connaissances de presque toutes les informations pertinentes, autant en format texte qu'en format graphique bitmap (bmp). Il va de soi que la base des connaissances va devoir contenir non seulement des connaissances en électrothermie mais aussi dans d'autres domaines connexes. De telles connaissances se trouvent souvent dans des tables thermodynamiques, des abaques, des "Handbooks", "Databooks" et des publications scientifiques. Le traitement de l'information devra se faire de la façon la plus efficace possible en appliquant certaines règles établies à priori dans la

pratique courante de l'électrothermie. L'application de ces règles se fera évidemment par l'entremise de la programmation par objets. Pour ce faire il faudra programmer une coquille commerciale à l'aide du langage PRL pour qu'il serve de support au système qu'on tente de développer.

La phase 2 consiste en l'étude de faisabilité du projet. A ce stade-ci, le problème, le concept de système et la technologie disponible sont étudiés. Les questions à répondre comprennent:

-Quelle partie du problème on essaie de résoudre, ou bien est-ce qu'on essaie de résoudre le problème au complet ?

Dans une première approche, nous essayons de régler une partie du problème et pas le problème au complet. Il s'agit alors de régler un problème d'accès à l'information requise pour mener à terme une analyse électrothermique. De telles informations sont souvent éparpillées un peu partout comme les textes scientifiques et les ouvrages spécialisés ou dans les institutions et organismes de recherche et de développement dans le domaine de de l'électrothermie et même ailleurs comme c'est le cas des institutions qui se spécialisent dans la recherche des phénomènes d'échanges et la mécanique des fluides, la science des matériaux, la physique du solide et le développement de codes numériques. Du côté du calcul numérique et de la mesure thermique il n'y a pas beaucoup des choses qui ont besoin d'être améliorées davantage, c'est plutôt l'aspect relatif à la modélisation qui en a le plus besoin.

-En quelques mots, en quoi va consister la version finale du système ?

La version finale du système va ressembler à une coquille qui va se servir des interfaces graphiques, des fenêtres et des écrans interactifs pour permettre à l'utilisateur d'accéder à l'information électrothermique ou autre qu'il souhaite avoir. Cette même coquille va permettre de communiquer avec des fichiers qui vont contenir des informations traitables par un ou des

codes de simulation numérique. Bref, le système va ressembler à une base de données qu'il sera possible de compléter, au fur et mesure, avec des connaissances en électrothermie et dans d'autres domaines connexes. Toutefois le système ne pourra pas répondre à toutes les interrogations possibles en matière thermique, avec le temps il deviendra de plus en plus performant sur un sujet en particulier mais pas tous les sujets thermiques possibles.

-Comment la technologie associée aux systèmes experts va être appliquée au problème ?

La technologie associée aux systèmes experts va être appliquée au problème par l'entremise de la programmation adéquate de la coquille commerciale LEVEL5 OBJET et par l'interfaçage éventuel de cette dernière avec un ou des logiciels de simulation numérique. Il s'agit alors, tout premièrement de prendre une coquille commerciale vide du type LEVEL5 OBJET et de la remplir par la suite avec des connaissances relatives au domaine de l'électrothermie. Le gestion de l'information sera assurée par l'exécution appropriée des règles que le moteur d'inférence va traiter.

-Existe-t-il un expert disponible pour travailler sur le système ?

Pour la période allouée au développement d'un prototype du système il n'est pas possible de travailler conjointement avec un expert dans le domaine, nous tentons alors de recueillir le plus d'information possible à travers différentes sources. Éventuellement, nous espérons amener plusieurs experts sur place pour qu'ils collaborent avec le développement du système expert.

-Est-ce que le système va être fiable , la technologie associée aux systèmes experts va-t-elle trouver une solution efficace au problème et a-t-on tout ce qui est requis au développement du système ?

Le système va être fiable par rapport à la coordination des ressources d'information requises dans l'analyse électrothermique. La technologie associée aux systèmes experts ne va pas trouver une solution efficace au problème car ceci est une tâche de la personne qui entreprend des analyses

électrothermiques, si l'on préfère, la technologie systèmes experts va rendre la pratique de cette technique beaucoup plus intelligente qu'auparavant. L'expert en électrothermie va trouver une solution au problème par l'entremise de la simulation et la mesure, tout en se servant du système expert pour l'assister dans la recherche d'information. Pour le moment, on a tout ce que ça prend pour développer une première version de système expert qui va jouer ce rôle, car il suffit d'avoir une coquille commerciale et la remplir de façon adéquate avec des connaissances dans le domaine de l'électrothermie. La plupart des coquilles commerciales possèdent tous les outils nécessaires pour faire l'acquisition des connaissances, pour inférer des règles et pour traiter le savoir contenu dans la base des connaissances.

-Est-ce que le système peut être développé à un coût favorable ?

Ceci est tout à fait vrai, car le coût d'une coquille commerciale peut être différent de celui d'un logiciel de simulation ou celui d'une camera infrarouge. Toutefois, c'est la compilation des connaissances qui peut s'avérer un processus pour ainsi dire assez coûteux. En effet, les connaissances en électrothermie sont éparpillées un peu partout et pour essayer de les regrouper sous une forme plus compacte il faudrait investir dans l'achat de certains volumes, dans la consultation de certains experts et dans des déplacements pour cueillir des informations. Pour une première version de système, le coût peut être quand même assez raisonnable.

Normalement une étude de faisabilité aide à déterminer s'il est convenable ou pas de continuer avec le projet de développement du système.

A l'étape 3 l'identification des critères de sélection doit être faite et il est évident que d'autres critères viendront se rajouter pendant le développement du prototype à la phase C. Pendant l'identification des critères on essaie de répondre aux questions suivantes

-Quels critères et exigences le système doit rencontrer ?

Un des critères des plus importants que le système doit rencontrer est celui du traitement et de la vérification des erreurs. Malgré le fait que la coquille LEVEL5 OBJET permet de traiter les erreurs de syntaxe dans la programmation en PRL (langage utilisé pour sa programmation), le système doit être capable de déceler des erreurs dans la formulation ou dans la demande d'information que les usagers vont faire. Si un usager désire obtenir des informations qui ne sont pas compatibles ou pertinentes à un problème donné, le système doit le signaler. Comme deuxième critère, le système doit être facile à utiliser et pour cela il faudra exploiter au maximum la capacité des interfaces graphiques et autres, pour que l'utilisateur ne se perde pas dans les démarches. Il va de soi que le système doit être également le plus explicatif possible sur la façon dont on doit procéder pour obtenir de l'information qui n'est pas disponible dans la base des connaissances.

-Quelle approche doit-t-on utiliser pour rencontrer quelques uns ou tous les critères et exigences ?

Pour assurer un traitement efficace des erreurs, il faudra bâtir la logique nécessaire et il faudra également bien structurer les règles de façon à ne pas les inférer à des niveaux qui ne conduisent à une conclusion précise et utile à la fois. Pour ce qui est du critère explicatif, il faudra illustrer de la meilleure façon possible les explications que le système va fournir en faisant usage de beaucoup de fichiers du type bitmap ou bmp. Un système qui va générer beaucoup de fichiers texte ne sera pas nécessairement très efficace. En dernier il faudra subdiviser le plus gros du problème en des sous-problèmes de plusieurs niveaux.

-Comment saura-t-on qu'on aura rencontré tous les critères ?

On saura qu'on a rencontré les critères et exigences lorsque des experts et des débutants auront essayé la première version de système expert.

La dernière étape dans la conceptualisation du système est l'analyse des critères et exigences. On s'attarde alors sur la fonctionnalité, la performance, et sur les détails relatifs aux interfaces requises. On évalue également qualitativement le logiciel à développer. Les questions à répondre à ce niveau sont les suivantes

-Quels critères et exigences le système sera capable de rencontrer ?

Le système sera capable de rencontrer les exigences en matière de traitement des erreurs car il sera possible de programmer des règles à cet effet. De la même façon, le système sera capable de rencontrer les critères de facilité d'utilisation car la coquille elle-même a été développée avec cette optique.

-Quelles fonctions pourra offrir le système ?

Le système pourra offrir la fonction d'outil d'aide à la modélisation des systèmes électriques et électroniques qui chauffent par action directe. Une deuxième fonction que le système pourra remplir est celle d'outil d'acquisition de l'information sur le domaine électrothermique car sa base des connaissances pourra être modifiée et mise à jour.

-Quelles sont les exigences en matières d'interfaces pour le système ?

En matière d'interface, le système doit permettre à l'utilisateur de communiquer de façon interactive le plus facilement possible. D'un côté il faudra aussi que les interfaces du système permettent de traiter des informations ou des résultats de mesure et simulation obtenus avec d'autres systèmes ou codes numériques qui résident ailleurs.

-Quels facteurs de qualité doivent être associés au développement du système ?

Au développement du système il faudra associer les facteurs de qualité suivants:

-La portabilité des informations que le système fournit.

-L'aspect pédagogique et formateur en matière de connaissances en électrothermie.

- La facilité de modifier les règles et du savoir contenu dans la base des connaissances.
- Le raccourcissement du temps requis à la modélisation des systèmes électriques et électroniques qui génèrent de la chaleur par action directe.

-Comment va-t-on évaluer le système de développement pour son utilisation pratique ?

Le système va être évalué dans son utilisation pratique et d'après le type de calculs qu'il sera capable d'effectuer et finalement d'après les possibilités d'interfaçage avec d'autres logiciels et périphériques.

-Est-ce que le technologie associée à l'intelligence artificielle semble toujours appropriée ?

La technologie associée aux systèmes experts semble toujours être appropriée car l'utilisation de langages de procédure pour essayer de résoudre le problème serait fort compliqué. L'expertise a longtemps été documentée sous forme écrite dans des livres, manuels, 'Handbooks' et autres. La technologie associée à l'intelligence artificielle nous permet de documenter l'expertise d'une manière beaucoup plus avantageuse. Le développement d'une base de connaissances diffère beaucoup de la programmation en COBOL ou FORTRAN. Un programmeur qui utilise FORTRAN ou COBOL sera plus concerné par ce qui peut se passer à l'intérieur du programme ou de l'application logicielle. D'une certaine manière, les procédures sont définies d'après la façon dont elles doivent interagir entre elles et d'après la façon dont les données vont être transférées et échangées dans l'application logicielle. Lorsqu'il s'agit de programmer une coquille commerciale la personne en charge sera concernée par ce que les données peuvent être (l'expertise) et par comment les choix d'une donnée plutôt qu'une autre se font et pourquoi ces choix se font. Le programmeur d'une coquille est donc plus concerné par le comment et par le pourquoi, il analyse les ramifications possibles de la connaissance pour par la suite essayer de bâtir un système expert qui reflète une telle ramification et qui fournisse par conséquent l'expertise requise dans une consultation quelconque. Le contenu d'une base de connaissances sera largement déterminé à partir d'une telle analyse. Il faut alors choisir une coquille qui va être en mesure de refléter

- la complexité du problème

- les connaissances du domaine

- les solutions possibles

Une fois qu'une coquille sera choisie, il sera possible de représenter les connaissances d'un expert et d'autres connaissances dans un domaine relié au problème.

-Est-ce que les connaissances dans le domaine sont disponibles et suffisantes ?

Les connaissances dans le domaine ne sont pas toujours disponibles et suffisantes, elles sont éparpillées un peu partout et il est nécessaire de les rassembler le plus possible.

-Existe-t-il de l'incertitude dans le domaine des connaissances du sujet ?

Il existe en effet certaines incertitudes dans le domaine des connaissances électrothermiques. Il y a un bon nombre de paramètres pour lesquels on fait souvent des estimations sans qu'il ait une méthode établie et reconnue qui permette d'obtenir des vraies valeurs.

-Comment les connaissances sont-elles acquises ?

Les connaissances dans le domaine électrothermique sont souvent acquises par l'entremise de la formation académique et l'expérience de longue date.

-Quelle schéma de représentation des connaissances semble être le plus approprié ?

Les règles sont en quelque sorte le schéma de représentation le plus approprié, toutefois à l'intérieur de ces règles il faudra inclure certaines équations analytiques et certaines méthodes graphiques de calcul.

-Quel mécanisme d'inférence semble être le plus approprié pour le projet en cours ?

Pour le projet en cours le mécanisme d'inférence qui semble être le plus approprié est l'hybride qui permet le chaînage avant (pour explorer une situation ou un but sans qu'il ait un antécédent ou fait donné) et le chaînage arrière (pour faire la vérification d'une hypothèse suscitée par

certaines constations, faits ou antécédents) avec un retour au chaînage avant lorsqu'une hypothèse n'aura pas pu être validée.

A l'étape B on s'attaque au problème du choix d'outils et plus précisément à l'analyse des outils disponibles. En bref, les systèmes de développement doivent être considérés comme des bases des données commerciales. La plupart du temps on les achète et on les remplit avec des données, tout en laissant le développement de bases de données aux concepteurs des logiciels. Cette approche est beaucoup plus efficace en termes de coûts et de ressources. Cette philosophie doit être appliquée lorsqu'on tente de développer un système expert, il est préférable de faire l'acquisition d'une coquille et la remplir par la suite avec le savoir et l'expertise dans un domaine en particulier. Les premiers systèmes experts et les premières bases de données ont été développés sans avoir l'aide des outils commerciaux de développement qui existent aujourd'hui sur le marché.

A l'étape 5, plusieurs coquilles commerciales doivent être considérées pour en faire un choix par la suite tout en se servant des critères de sélection établis à priori. En général si le système qu'on tente de développer comporte moins de 500 règles et que la vitesse n'est pas un facteur important à considérer mais plutôt la portabilité du système, ce dernier peut être développé sur ordinateur personnel. De la même façon pour des applications de plus de 1000 règles, où la vitesse d'opération est un facteur clé, l'utilisation d'un mini-ordinateur ou un "mainframe" est plus conseillée. On doit alors pouvoir répondre aux questions suivantes à ce stade-ci

-Quels sont les outils de développement de systèmes experts qui existent sur le marché ?

Une bonne quantité parmi lesquels on retrouve ceux décrits à la page 22.

-Quel schéma de représentation des connaissances peuvent incorporer les différentes coquilles commerciales ?

Les règles de production et les meta-règles, les objets ou les classes, les réseaux sémantiques et la logique de premier ordre.

-Quels sont les mécanismes d'inférence utilisés par les coquilles commerciales ?

Le chaînage avant, le chaînage arrière et le mécanisme d'inférence mixte (les deux ensemble), la recherche "breadth-first", la recherche "depth-first", la recherche heuristique, la réduction de problème, le jumelage de formes ("pattern matching"), le contrôle hiérarchique, l'unification et le contrôle par occurrence d'événement.

-Quelle est la structure des interfaces utilisateur?. Sont-elles faciles à utiliser ?

La structure des interfaces utilisateurs est souvent celle d'une application logicielle écrite dans un langage de cinquième génération, parfois en PROLOG ou des fois en LISP et autres. De telles interfaces sont en général faciles à utiliser et à programmer et elles peuvent prendre des formes telles que celle d'un éditeur de règles d'objets, fenêtres graphiques, menus et écrans interactif, boutons poussoir etc.

-Quel sorte d'outils d'acquisition de connaissances possèdent les coquilles commerciales ?

La plupart des cas ce sont des outils qui ont la même structure des interfaces décrites auparavant.

-Quels autres types d'interfaces sont disponibles avec les produits (interfaces graphiques, facilités etc.) ?

Certaines applications matérielles sont parfois disponibles avec des coquilles commerciales pour faciliter le transfert d'information entre le système expert et un autre système et vice-versa.

-Dans quelle configuration matérielle peuvent opérer les coquilles commerciales ?

Tel que décrit auparavant les coquilles commerciales peuvent opérer autant dans les micro-ordinateurs que dans les mini-ordinateurs, les “mainframes” et les ordinateurs parallèles.

-Est-ce que ces applications matérielles sont à la disposition des personnes qui travaillent sur le développement du système ?

En effet, mais pour le moment on se contente de développer une première version de système expert sur un micro-ordinateur, avec l'espoir d'en faire une application ultérieure à un plus haut niveau.

-Est-ce que la compagnie qui distribue la coquille commerciale est disponible pour fournir de l'information et l'assistance nécessaire ?

La compagnie qui distribue le logiciel est disponible à fournir de l'information contre paiement plus précisément. Plusieurs cours de formation sont offerts par la compagnie et les prix sont pour ainsi dire assez hauts, sans compter le fait qu'il faut se déplacer assez loin.

-Quel est le coût du produit comparé à la fonctionnalité qu'il assure ?

Le coût du produit comparé à la fonctionnalité qu'il offre est assez bon car il permet à la longue de simplifier des démarches que jusqu'ici s'avèrent très coûteuses.

-Quelle documentation et formation sont disponibles avec le produit ?

La documentation qui est disponible avec le logiciel n'est pas tout à fait très complète. Des cours de formation sont disponibles comme on l'a déjà mentionné, mais cela n'est pas sans inconvénients car il faut se déplacer jusqu'aux États Unis.

-Existe-t-il plusieurs modules disponibles ?

Pas pour le moment.

L'étape 6 consiste en la sélection d'outils de développement. Ce processus de sélection doit être accompli en répondant aux questions suivantes

-Quels outils de développement peuvent être adaptés au schéma de représentation des connaissances proposé ?

Pour la première version de système expert que nous tentons de développer plusieurs d'entre eux peuvent être adaptés, mais surtout ceux qui permettent de traiter le plus d'information possible sous forme mathématique.

-Quels outils incorporent les techniques d'inférence requises ?

LEVEL5 OBJECT, NEXPERT et M4

-Quels outils possèdent les facilités requises (graphiques etc.) ?

Presque tous

- Quels outils satisfont une partie ou toutes les exigences du projet ?

LEVEL5 OBJECT, NEXPERT et M4

-Quels outils conviennent le mieux au budget disponible ?

LEVEL5 OBJET

La dernière étape à compléter est celle du développement du prototype, ce qui est en quelque sorte un processus itératif sur lequel il est souvent nécessaire de revenir à plusieurs reprises. Le processus comme tel comprend les cinq étapes suivantes, le développement du prototype, la documentation du prototype, la formation de l'utilisateur sur le prototype, l'utilisation du prototype par l'utilisateur et l'acceptation du prototype par l'utilisateur.

2.3 Répertoire des codes d'analyse numérique couramment utilisés en électrothermie

La liste des codes d'analyse numérique couramment utilisés en électrothermie n'est pas pour ainsi dire exhaustive, car il existe sur le marché une grande variété de codes conçus à cet effet et il est assez difficile de déterminer quel est le code le plus souvent utilisé et le plus versatile. Chaque code a ses atouts et ses faiblesses par rapport à d'autres. Il serait tout à fait plus facile de les classer d'après leur capacité de traiter des problèmes spécifiques de modélisation. Quelques codes permettent modéliser par exemple la rotation d'un rotor, d'autres permettent de modéliser des phénomènes aussi complexes que l'écoulement de fluides associé au transfert de chaleur par convection naturelle ou par convection forcée, en d'autres mots, chaque logiciel de simulation a sa particularité. Actuellement, il existe au-delà d'une centaine de codes d'analyse numérique et dans l'ensemble les logiciels suivants ont été utilisés au laboratoire d'électrothermie:

FLUX2D de Cédrat SA

FLUX3D de Cédrat SA

AUTOTHERM de Mentor Graphics

NISA de E.M.R.C.

2.3.1 FLUX2D de Cédrat SA

Celui-ci est un logiciel spécialement conçu pour l'électrotechnique et la thermique. On s'en sert comme outil d'analyse des phénomènes électriques, magnétiques et thermiques par la méthode des éléments finis. À l'aide de ce code de simulation numérique il est possible d'analyser tous ces phénomènes tout aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire. Comme son nom l'indique, le logiciel se prête à la modélisation des géométries à deux dimensions qui comportent des matériaux à caractéristiques linéaires ou non-linéaires, isotropes ou anisotropes. Parmi l'ensemble des facilités propres à FLUX2D il existe:

- Un descripteur géométrique complété d'un mailleur automatique et d'un mailleur assisté.
- Un descripteur des propriétés physiques des matériaux qu'on modélise.

- Un processeur de calcul.
- Un module d'analyse des résultats.

Le dialogue entre l'utilisateur et le code numérique est assuré par le biais d'une interaction permanente, des menus à arborescence et des commandes documentées

Modélisation d'une géométrie

La géométrie d'un dispositif est créée à l'aide de techniques de DAO, à partir d'un ensemble de points, de lignes construites en joignant les points et à partir des surfaces délimitées par les lignes. Les points peuvent être définis en plusieurs unités métriques et dans un système de coordonnées cartésiennes ou cylindriques. Les lignes qu'on représente peuvent être des segments de droites comme aussi des cercles et des arcs de cercle. La paramétrisation des coordonnées des points et des éléments qui définissent les arcs de cercle, permet de modifier très rapidement les dimensions des géométries tout en conservant leur forme de départ. Les surfaces quant à elles sont regroupées en régions qui doivent être identifiées par un nom choisi à priori.

Le maillage

Pour la génération des éléments finis, FLUX2D propose deux mailleurs dont un automatique basé sur la méthode Delauney, à l'aide de celui-ci il est possible de discrétiser les différentes géométries en éléments triangulaires de deuxième ordre. La finesse du maillage dans les régions dépend évidemment du nombre et de la répartition des noeuds que l'utilisateur aura créé sur les lignes qui délimitent les régions. À l'aide du mailleur assisté il est possible de créer des éléments triangulaires et quadrangulaires, ce qui permet en quelque sorte de diminuer le nombre d'éléments d'une modélisation et de mieux se rapprocher de la vraie géométrie d'un problème qu'on traite.

Les propriétés physiques

FLUX2D propose un choix assez complet d'applications de propriétés physiques pour les sources, les matériaux et pour les conditions aux limites qui sont normalement associées aux régions surfaciques, linéiques et ponctuelles. En ce qui a trait aux matériaux, une fois qu'ils sont définis par l'utilisateur, ils sont regroupés dans une banque accessible à un ou à plusieurs usagers. Les régions linéiques sont utilisées pour simuler des échanges avec l'extérieur, pour imposer la valeur d'une variable le long d'une ligne géométrique ou pour simuler des régions surfaciques très minces qu'on ne maille pas d'habitude et qui comportent soit des sources, des matériaux ou de l'air. Une épaisseur doit être toutefois associée à une telle région.

La résolution

La résolution d'une modélisation par la méthode des éléments finis est caractérisée par:

- la construction et l'assemblage des sous-matrices et sous-vecteurs propres pour chaque élément généré.
- la résolution du système linéaire par la méthode des gradients conjugués avec la factorisation incomplète de Choleski.

Pour traiter des matériaux à caractéristique non-linéaire le logiciel utilise un processus itératif basé sur la méthode de Newton-Raphson, ce qui permet d'accélérer la convergence de la solution. L'utilisateur a l'option de choisir la précision désirée et le nombre d'itérations à réaliser pour arriver à des résultats satisfaisants.

L'analyse des résultats

FLUX2D propose des nombreuses facilités pour traiter des résultats dont:

- des chartes de température en couleur
- des lignes isovaleurs
- des vecteurs
- un outil de calcul des grandeurs globales et ponctuelles

- des courbes pour représenter la variation dans le temps et dans l'espace d'une grandeur
- un outil d'extraction des valeurs nodales d'une variable pour être utilisées dans d'autres calculs
- l'option de sortie des valeurs calculées en format fichier ou sur imprimante

La fonctionnalité de FLUX2D est pour ainsi dire assez bonne, surtout qu'il permet de traiter des problèmes qui tiennent compte du mouvement rotatif de pièces mécaniques. Dans le cas d'un moteur le logiciel utilise à cet effet une mince région circulaire appelée "bande roulante", laquelle est située dans l'entrefer qui entoure le rotor. Pendant le calcul du régime transitoire le rotor peut prendre plusieurs positions. Grâce à cette bande roulante, la discrétisation en éléments finis du restant du modèle reste intacte, c'est seulement le maillage de la bande roulante qui sera modifié pour tenir compte des nouvelles positions du rotor. Celle-ci est une technique qui fait appel à la notion du couplage d'éléments tel que décrit par les travaux de D. Roger et al. [6]. Malgré le fait que FLUX2D est probablement un des logiciels des plus faciles à utiliser, la documentation mise à la disposition de l'utilisateur est tout à fait insuffisante et incomplète. À ce moment-là, il est nécessaire d'être en contact direct avec le distributeur du logiciel pour tenter d'obtenir de l'information. Une telle démarche représente toutefois un gros investissement en temps et en argent.

2.3.2 FLUX3D de Cédrat SA

Le logiciel FLUX3D est fait par la même compagnie qui distribue FLUX2D. Ce code permet alors de rajouter une troisième dimension à la modélisation par éléments finis et à l'instar de FLUX2D il comprend un descripteur géométrique et un descripteur des propriétés physiques. Son mailleur est toutefois automatique et permet seulement de générer des éléments tétraédriques de premier et de deuxième ordre. En ce qui a trait à la résolution d'un modèle et à l'exploitation des résultats, tout se fait de la même manière qu'avec FLUX2D. Les domaines d'application du code quant à eux sont principalement l'électrostatique, l'électrocinétique et la magnétostatique, un choix qu'on peut considérer assez restreint en soi, si nous comparons les options disponibles sur

FLUX3D avec celles qui sont disponibles sur FLUX2D. Il n'est pas possible à l'aide du code décrit de tenir compte du mouvement de rotation de pièces mécaniques, comme il n'est pas possible non plus de traiter des problèmes thermiques, magnétothermiques et électrothermiques. Un autre inconvénient est la forme des éléments que le mailleur automatique permet de créer, d'une certaine manière les éléments se prêtent mal pour la modélisation de formes géométriques arrondies telles que les cercles et les arcs de cercle. Il va de soi aussi que la documentation mise à la disposition de l'utilisateur est encore une fois une grosse lacune que les concepteurs de cette série de logiciels ne réussissent pas à combler.

2.3.3 DISPLAY3 de NISA

DISPLAY3 est un logiciel en principe conçu pour la modélisation et l'analyse de problèmes de type mécanique, mais sa configuration modulaire permet très bien de faire son utilisation pour l'analyse d'un gros éventail de sujets scientifiques dont le transfert de chaleur évidemment. S'il suffit parfois de quelques lignes pour décrire un code numérique de simulation par éléments finis, DISPLAY3 est une exception à cette règle. En effet, ça prendrait des centaines de pages pour pouvoir définir en détail les capacités de traitement de ce code numérique, car peu de sujets semblent échapper aux applications qui ont été prévues par ses concepteurs. Son adaptabilité à l'analyse des phénomènes électrothermiques est due en grosse partie à la facilité avec laquelle il est possible de modéliser des sources et des conditions aux frontières.

Les options et les facilités que la plupart de logiciels possèdent, DISPLAY3 les possède en version beaucoup plus avancée et versatile à la fois. Son descripteur géométrique comprend des facilités pour définir des positions et des objets dans l'espace à l'aide de points, de lignes droites ou de segments curvilignes, de surfaces planes appelées PATCHES et à l'aide de surfaces volumiques à trois dimensions appelés HYPERPATCHES. Tous ces éléments sont donc définis comme étant des entités géométriques, et pour les générer, à-peu-près tout ce qui est connu

comme technique DAO a été incorporé dans la programmation interne du logiciel. Les entités géométriques peuvent donc être copiées, miroitées, translatées vectoriellement ou par rotation etc.. En ce qui a trait au maillage, il est possible de discrétiser les géométries modélisées à l'aide d'un mailleur automatique ou d'un mailleur manuel configuré en menu à arborescence. On peut alors représenter des géométries autant en deux dimensions qu'en trois dimensions avec des éléments de premier, deuxième et troisième ordre. Un total de 27 types d'éléments différents sont ainsi disponibles pour l'analyse thermique seulement. Il est en plus possible de simuler l'écoulement des fluides et les phénomènes de transfert de chaleur qui dépendent du temps ou de la température. La présentation graphique et la manipulation des résultats peuvent être faites de façon interactive à l'aide d'un module conçu spécialement à cet effet. Entre autres, les résultats peuvent être présentés sous forme de:

- géométries déformées superposées aux géométries de départ
- contours ou chartes de température
- des coupes spécifiques des modèles à trois et à deux dimensions
- des représentations animées des géométries déformées par l'action des stress thermiques.

A tout ceci se rajoute une grande portabilité des fichiers de modélisation et de simulation, ces derniers peuvent en effet être convertis en format binaire, ASCII, postscript ou autres. De gros volumes décrivent en profondeur le code numérique et ses applications possibles, toutefois l'interface d'aide à l'utilisateur n'est pas aussi efficace que les autres facilités du logiciel.

2.3.4 AUTOTHERM de Mentor Graphics

Celui-ci est un logiciel qui a été avant tout conçu pour l'analyse électrothermique des circuits intégrés. Il est le produit du remue meninges de plusieurs compagnies et instituts de recherche spécialisée. Jusqu'à ce moment-ci c'est probablement le code numérique de simulation le plus intelligent qui existe sur le marché. Ce code a été développé sur une plate-forme de programmation Falcon FRAMEWORK de Mentor Graphics, compatible avec la plupart des

stations de travail et la plupart de systèmes d'exploitation commerciaux. La caractéristique principale d'Autotherm réside dans le fait que le logiciel a été configuré en grande partie en système expert pour faciliter considérablement toutes les étapes de calcul, de modification et de résolution, à un point tel que ce code peut être utilisé autant par des experts que par des débutants.

La description des géométries se fait à l'aide de menus à arborescence et à l'aide d'icônes. Le maillage des modélisations se fait par contre de façon automatique en éléments triangulaires et l'utilisateur n'a aucun contrôle sur le nombre d'éléments ainsi générés. Toutefois, il est possible de choisir l'ordre des éléments (premier, deuxième, troisième et quatrième). Les étapes de calcul et le traitement des résultats se font de façon conventionnelle en chartes de températures, graphiques et autres. La documentation mise à la disposition de l'utilisateur est contenue dans un CD-ROM, fait assez particulier car presque tout ce qui est nécessaire comme information pour la modélisation et l'analyse est disponible "on-line", rien ne semble avoir été négligé. Il existe de plus des bibliothèques pour le calcul et la détermination de certains paramètres de modélisation. Le code permet aussi de simuler l'écoulement des fluides qui intervient dans le transfert de chaleur par convection naturelle ou forcée. Il va de soi que le temps requis pour traiter un problème de modélisation à l'aide d'Autotherm est relativement court par rapport au temps qu'on doit consacrer pour obtenir des résultats avec d'autres codes de simulation numérique.

Parmi les autres codes commerciaux qui n'ont pas été essayés au laboratoire nous avons les logiciels suivants avec leur champ d'application direct:

ATILA (ISEN Recherche)

- Moteurs ultrasoniques

ANSYS-PC/Magnetic (Swanson Analysis Systems Inc.)

- Électromagnétisme

COSMOS/EM (Structural Research)

- Électromagnétisme

MAGNETO/AMPERES (Integrated Engineering Software)

- Électromagnétisme

MAXWELL 2D/3D (Ansoft Corporation)

- Électromagnétisme

MEGA (University of Bath)

- Électromagnétisme
- Thermique

OPERA/TOSCA/ELECTRA (Vector Fields)

- Électromagnétisme

OPUS (Magnus Software Corporation)

- Électromagnétisme

2.4 Conception d'interfaces de protocole de communication entre un système expert en électrothermie et les divers codes d'analyse répertoriés

Pour pouvoir comprendre le principe de conception d'interfaces de protocole de communication entre les différentes applications informatiques il est nécessaire de s'attarder un peu sur le principe de fonctionnement des processeurs lors des premières implantations de système d'exploitation DOS et lors de l'implantation de l'environnement de programmation WINDOWS. Au tout début le système d'exploitation DOS fut conçu pour être un système mono-

tâche et mono-utilisateur. L'utilisation du processeur dans la gestion des ressources n'était pas du tout optimisée, car l'organisation des tâches (scheduling) se faisait à l'aide d'algorithmes aussi inefficaces que l'algorithme LIFO (last in first out) ou l'algorithme FIFO (first in first out). Dans un tel scénario certains périphériques monopolisaient le processeur et les temps d'attente et par conséquent d'exécution étaient assez longs. De plus la notion d'interface était un vrai mystère car il fallait être un grand connaisseur de la syntaxe des commandes et des paramètres des procédures pour pouvoir exécuter certaines applications. Les interfaces ont toujours existé, le seul fait de vouloir connaître le statut d'une donnée ou des paramètres d'une procédure exige la création d'une interface et quand les interfaces graphiques n'étaient pas disponibles seulement une élite de programmeurs pouvaient manipuler efficacement les différentes applications disponibles sur le marché.

Avec le temps la technologie associée à l'architecture des processeurs a évolué énormément et un nouvel algorithme d'organisation des tâches fut alors implanté, celui du "Round Robin" ou celui de l'oiseau qui alimente ses poussins un par un en forme de cercle à des intervalles de temps égaux. En termes informatiques ceci se traduit par l'allocation d'une unité de quantum (temps processeur) à chaque périphérique que le processeur doit gérer, en revenant toujours au point de départ. De cette manière les temps d'attente ont été diminués considérablement. Suite à cette utilisation optimale du processeur on a fait un gain énorme en termes d'utilisation de la mémoire aussi et finalement l'environnement de programmation WINDOWS fut introduit. À l'aide de ce dernier on a réussi à simuler un environnement multi-tâches multi-fenêtré. À partir de ce moment la création d'interfaces graphiques, pour traiter des informations ou pour établir une communication entre les différentes applications résidentes dans un système, est devenue de plus en plus à la portée des usagers en général. L'utilisation de la souris, des icônes et des fenêtres pour passer d'une application à une autre, nous évite aujourd'hui de devoir connaître un bon nombre de notions sur le fonctionnement interne du système d'exploitation DOS et l'environnement de programmation WINDOWS. Établir une

communication entre LEVEL5 et certaines applications sur ordinateur personnel n'est pas une tâche impossible dans un environnement comme WINDOWS, toutefois certaines restrictions s'imposent car très peu d'applications ont été configurées jusqu'à présent pour être 100% compatibles avec un système de développement comme LEVEL5 OBJECT, il en existe quand même quelques unes et ce sont des applications de bases de données.

Donc, la création d'une interface pour établir une communication entre un système expert en électrothermie et les différents codes d'analyse numérique répertoriés est une tâche pour ainsi dire faisable car la plupart des coquilles commerciales ont été conçues avec une optique import/export. Tel que mentionné auparavant la coquille LEVEL5 OBJECT possède de manière inhérente toute la programmation requise pour communiquer avec des bases de données. On peut donc accéder, à partir de LEVEL5 OBJET, à des bases de données du type dBASE3, FOCUS, Rdb/SQL et EDA/SQL. Le protocole DDE est alors disponible pour remplir cette fonction. DDE est un protocole pour échanger de données entre des programmes Windows. Ce protocole a été conçu pour la standardisation du transfert de données entre deux programmes. Le programme qui déclenche la communication est le "client" et le programme qui répond au client est le "serveur". Le client peut éventuellement envoyer des données (poke) au serveur et lui en réquisitionner également ou lui demander d'exécuter une commande spécifique, telle que l'impression d'un fichier ou l'exécution d'une macro. Dans le contexte actuel LEVEL5 OBJET fonctionne seulement en client.

L'applicabilité de ce principe de communication s'avère surtout efficace pour la modification des paramètres de modélisation contenus dans les différents fichiers générés par les codes numériques de simulation qui sont disponibles au laboratoire d'électrothermie à condition que les fichiers soient convertis sous forme de base de données. Mais ceci n'est pas envisageable pour des raisons pratiques. Toutefois, LEVEL5 OBJET permet d'activer toute application résidente dans son système. Étant donné qu'il s'agit d'une version PC le seul code répertorié qui

réside dans le système est DISPLAY3 de NISA, c'est alors le seul code que nous pouvons accéder par l'entremise de la coquille disponible en ce moment. Les autres logiciels de simulation résident dans des stations de travail connectées en réseau et ne permettent pas d'établir une communication de façon aussi simple. Pour arriver alors à communiquer avec un logiciel qui réside ailleurs que dans le système où se trouve la coquille de développement il est nécessaire d'avoir accès à une interface du type Internet et utiliser un protocole de communication FTP (file transmission protocole) et ceci c'est le scénario qui s'applique pour établir une communication entre un système supporté par MS-DOS et un système supporté par UNIX. Dans notre cas, la coquille se trouve dans le premier environnement et les autres codes de simulation numérique se trouvent dans le deuxième environnement. A l'aide d'un FTP il serait au moins possible d'aller chercher les informations contenues dans les fichiers générés par les codes non-résidents pour les modifier ou les emmagasiner dans la base de connaissances, si le besoin s'impose. De telles informations sont enregistrées sous forme de fichiers ASCII, donc assez facile à comprendre et à modifier. Ceci s'applique seulement pour la version SUN de DISPLAY3 car les autres codes de simulations génèrent d'autre types de fichiers qui ne sont pas facilement modifiables.

D'un autre côté s'il est question d'aller chercher des résultats de simulation la tâche s'avère plus délicate, car il faudrait aller chercher ces résultats sous forme de fichiers postscript, par la suite il faut les compresser à l'aide de l'interface Ghoscript et en dernier il faut les traduire en fichiers Bitmap pour être en mesure de les visualiser à l'aide du système expert ou pour les emmagasiner dans la base des connaissances éventuellement. DISPLAY3, Autotherm, FLUX2D et FLUX3D permettent tous de générer des fichiers de résultats sous forme de fichiers postscript, mais leur transfert ne peut se faire de façon directe.

Dans les meilleurs des cas nous pouvons pour le moment activer la version PC de NISA à partir de LEVEL5 OBJET, il s'agit simplement d'exécuter la commande ESTABLISH "IPU, EXTERN, nisa386.exe". Ceci nous permet d'ouvrir l'application et faire tout ce que nous voulons

faire. Une fois que nous quittons NISA nous revenons à l'application système expert à partir de laquelle nous avons établi la communication. Suite à ceci, si nous voulons exécuter le fichier NISA que nous venons de modifier ou un autre fichier NISA, il suffit d'activer le module HEAT en lui spécifiant le nom de fichier que nous voulons faire rouler. Le contrôle est transféré à NISA386 jusqu'au temps que la simulation lancée soit finie. Celle-ci est une démarche qui requiert le chargement du code de simulation numérique et son utilité est surtout celle de faire une nouvelle modélisation quelconque par éléments finis ou bien d'en modifier une déjà existante, autant au niveau de la description de la géométrie qu'au niveau du maillage et des conditions aux frontières.

Si on cherche simplement à modifier certains paramètres de modélisation tout en gardant la même configuration de modélisation il suffit de modifier le fichier .nis de l'application en question. Pour ce faire il est nécessaire d'éditer le fichier .nis avec un éditeur de texte approprié.

CHAPITRE III

CRÉATION D'UNE BASE DE CONNAISSANCES EN ÉLECTROTHERMIE

3.1 Généralités

Le développement d'une base de connaissances en électrothermie est en quelque sorte un processus assez similaire à celui de développer une application logicielle et à écrire un manuel d'utilisation au même temps. Ceci s'impose comme fait pour pouvoir être en mesure de représenter la logique d'un expert en électrothermie à l'intérieur de la base des connaissances. La codification du savoir se fait sous une forme dont nous ne sommes pas habitués à voir dans la programmation classique. L'apprentissage de cette nouvelle forme est assez simple en soi et à l'heure actuelle beaucoup de coquilles permettent de codifier la logique des prédicats sous une forme qui ressemble à la représentation des connaissances sous forme de règles.

Le schéma de représentation des connaissances à travers les objets et à l'aide des réseaux sémantiques requiert une organisation logique similaire. Toutefois, la forme dont cette logique est représentée est beaucoup moins conventionnelle. Il va de soi que pour le développement d'une base de connaissances on utilise des outils très semblables à ceux qui sont mis à la disposition des concepteurs d'applications logicielles en langages de procédures. Les éditeurs de base de connaissances et les debuggers en sont un bon exemple. Les éditeurs de bases de connaissances sont très semblables aux éditeurs de texte ou de code source. Les premiers sont utilisés pour générer et pour modifier le texte de la base des connaissances, les debuggers sont à leur tour utilisés pour détecter les erreurs de syntaxe et gérer le processus de modification de la base. La vérification de la syntaxe est une implantation qui permet d'éviter que des erreurs comme l'usage illicite des caractères réservés ou autres, soit détecté pendant l'édition des connaissances plutôt qu'à la compilation ou l'exécution de celles-ci. Une fois que les systèmes experts sont développés de façon graduelle les modifications de la base des connaissances s'imposent comme une norme de rigueur plutôt qu'une exception. Il est aussi possible d'utiliser les outils de debuggage pour

détecter des erreurs à l'intérieur de la base des connaissances de la même manière qu'un programmeur les utiliserait pour détecter des erreurs dans un programme d'ordinateur. Les outils de debuggage ont des fonctions telles que le traçage, les points d'arrêt ou de pause comme aussi la gestion des entrées usager et des bases de données de test. Le traçage fournit de l'information de navigation pour une session d'exécution du système expert en particulier. Au fur et mesure que l'usager avance dans une session l'outil de traçage saisit des informations qui décrivent la façon dont la session navigue à travers de la base des connaissances. Après une session il est donc possible d'analyser cette information de traçage. Les points d'arrêt permettent d'arrêter le système expert lorsqu'un niveau dans la bases des connaissances est atteint. Ceci permet de détecter les connaissances qui génèrent des causes d'erreur ou des conclusions anormales. Les bases de données des entrées usager sont utilisées pour emmagasiner les réponses, les choix et les connaissances qu'un usager fournit pendant une session. Ces bases de données peuvent être utilisées pour debugger un système et pour aider aux concepteurs d'un système expert des ensembles de test pour usage ultérieur. Les bases de données de test sont utilisées pour enregistrer des ensembles de cas typiques de test suite à des modifications dans la base des connaissances dans le but vérifier si les résultats espérés ont eu lieu, si les changements ont eu lieu et si le restant de l'information contenue dans la base des connaissances reste inchangée.

La programmation d'une base de connaissances est souvent vue comme un projet de documentation. D'une certaine manière, un bon nombre de systèmes experts sont des applications logicielles dynamiques de plusieurs documents relatifs à un domaine en particulier et à d'autres domaines connexes. De la même manière, la programmation d'une base de connaissances est souvent similaire au développement d'une structure de données sous forme de diagramme ou d'arbre logique. Les connaissances représentent les composantes des arbres et des diagrammes logiques de même que leur relation.

L'expertise a longtemps été documentée sous forme écrite dans des livres, manuels, handbooks et autres. La technologie associée à l'intelligence artificielle nous permet de documenter l'expertise d'une manière beaucoup plus avantageuse. Le développement d'une base de connaissances diffère beaucoup de la programmation en COBOL ou FORTRAN. Un programmeur qui utilise FORTRAN ou COBOL sera plus concerné par ce qui peut se passer à l'intérieur du programme ou de l'application logicielle. D'une certaine manière, les procédures sont définies d'après la façon dont elles doivent interagir entre elles et d'après la façon dont les données vont être transférées et échangées dans l'application logicielle. Lorsqu'il s'agit de programmer une coquille commerciale la personne en charge sera concernée par ce que les données peuvent être (l'expertise) et par comment les choix d'une donnée plutôt qu'une autre se font et pourquoi ces choix se font. Le programmeur d'une coquille est donc plus concerné par le comment et par le pourquoi, il analyse les ramifications possibles de la connaissance pour par la suite essayer de bâtir un système expert qui reflète une telle ramification et qui fournit par conséquent l'expertise requise dans une consultation quelconque. Le contenu d'une base de connaissances sera largement déterminé à partir d'une telle analyse. Il faut alors choisir une coquille qui va être en mesure de refléter

- la complexité du problème
- les connaissances du domaine
- les solutions possibles

Une fois qu'une coquille commerciale sera choisie, il sera possible de représenter les connaissances d'un expert et d'autres connaissances dans un domaine relié au problème. Dans notre cas presque tout ce qui a été décrit en termes d'outil de programmation d'une base de connaissances est disponible sur la coquille LEVEL5 OBJET. La tâche qui s'avère la plus difficile à accomplir est celle de la représentation des connaissances dans un schéma approprié, pour ce faire il faudra évidemment formuler de telles connaissances sous forme de règles de production. Ces règles sont celles qui vont être utilisées pour calculer des paramètres de modélisation tels que les pertes dans des conducteurs, dans des circuits magnétiques et dans des

circuits intégrés, de même que les différents facteurs de convection et de radiation qui s'appliquent aux modes de refroidissement dans chaque cas traité.

3.2 Concepts de base

A l'aide de la coquille LEVEL5 OBJET il sera possible de bâtir une base de connaissances en électrothermie qui pourrait représenter de façon adéquate la complexité du problème qui se reflète dans l'échauffement par l'action directe de l'énergie électrique des systèmes électriques tels que les moteurs, les transformateurs et les bobines de chauffage par induction, des systèmes électroniques tels que les convertisseurs de puissance ou les circuits intégrés. La telle complexité du problème réside dans la façon dont nous devons nous prendre pour calculer de manière précise les pertes par conduction dans chaque cas, les pertes par hystérésis et par courant de Foucault dans le cas des applications électromagnétiques tout aussi comme les pertes reliées aux hautes fréquences par l'effet pelliculaire. Suite à ceci il sera question aussi de calculer les différents coefficients de transfert de chaleur qui s'appliquent aux modes de refroidissement par convection naturelle, convection forcée et par radiation. C'est donc à partir de ces énoncés qu'il faudra procéder à la formulation des connaissances sous forme de règles de production. La manière dont nous allons formuler ces règles va refléter une bonne partie des connaissances dans le domaine électrothermique car il ne sera pas facile de dès un début de pouvoir les formuler toutes. Les solutions possibles aux problèmes qui vont se poser vont évidemment être générées par le moteur d'inférence de la coquille utilisée. La validité des solutions dépendra fortement de la façon dont nous aurons formulé les règles de production. Dans un premier temps, l'utilisation de LEVEL5 OBJECT pour bâtir un prototype de système expert en électrothermie se fera de la façon la plus simple possible, car avec la coquille en question il est possible de générer des solutions de plusieurs manières différentes. Autant nous pouvons faire appel aux demons, aux méthodes WHEN NEEDED, aux méthodes WHEN CHANGED, aux règles qu'à la génération de buts dans l'agenda. C'est sûr et certain qu'il existe des méthodes plus raffinées que d'autres pour bâtir une application, mais ceci n'est pas le but de

ce travail, nous recherchons surtout à explorer les possibilités d'adapter le concept d'intelligence artificielle à la pratique d'une technique particulière.

Donc pour chaque volet mentionné dans les paragraphes qui suivent, une application .knb sera créée. Ce sont les types de fichiers exécutables par LEVEL5 OBJECT. À chaque fois qu'un fichier .knb est généré, une nouvelle base de connaissances est générée aussi. Dans cette base de connaissances on emmagasine tout ce que les éditeurs d'objets et de méthodes nous permet de générer. L'éditeur de fenêtres d'affichage nous permet de générer et d'éditer des fenêtres d'affichage, l'éditeur d'objets nous permet de créer et d'éditer des classes ou objets à différents attributs, l'éditeur de méthodes quant à lui nous permet de créer et d'éditer des méthodes WHEN CHANGED, WHEN NEEDED, des règles et des daemons. Un moniteur d'exécution permet aussi de visualiser de manière graphique comment les solutions sont générées. Une explication plus détaillée sera donnée plus loin dans le texte sur la façon dont chaque application a été conçue.

3.2.1 Calcul des pertes résistives dans les conducteurs

La loi de Joule stipule que toute substance conductrice de l'électricité traversée par un courant électrique est le siège d'un dégagement de chaleur. La puissance électrique transformée en chaleur s'exprime par la relation suivante

$$P = VI = RI^2 = \frac{V^2}{R} \quad (1)$$

Si une même puissance électrique est utilisée pendant un temps t , l'énergie transformée en chaleur a pour valeur

$$E = Pt = RI^2 t \quad (2)$$

P s'exprimant en Joules par seconde.

Dans la pratique industrielle, la puissance s'exprime généralement en kilowatts et l'énergie en Kilowattheures, celle-ci représente l'énergie dissipée en une heure par un circuit absorbant une puissance constante de 1 kW soit une énergie de 3600 kJ. Cette relation suppose que les différentes grandeurs physiques soient constantes; dans le cas contraire, il faut déterminer l'énergie émise par

$$E = \int_0^t V_t I_t dt \quad (3)$$

Dans le cas du courant alternatif, on se ramène en pratique pour chaque alternance, au cas des grandeurs physiques constantes. Un récepteur alimenté sous une tension alternative $V(t)$ et traversé par un courant $I(t)$ déphasé d'un angle ϕ par rapport à la tension, absorbe une puissance active P égale à

$$P = VI \cos\phi \quad (4)$$

V et I étant exprimées en valeurs efficaces pendant une période. Le courant et la tension sont pratiquement en phase dans une résistance électrique et l'expression précédente a la forme simplifiée de la loi de Joule de l'équation 1.

3.2.2 Calcul des pertes résistives en tenant compte de l'effet de la température sur la résistance des conducteurs

La résistance électrique de la plupart des métaux augmente lorsque la température augmente. Ceci est dû au fait à l'accroissement d'activité dans les atomes qui cause plus de collisions entre les électrons qui forment le courant, lequel est ainsi réduit. L'énergie thermique produite dans le matériau continue à faire monter la température de ce dernier jusqu'à ce que la chaleur transférée au milieu ambiant soit égale à la chaleur produite, à ce moment-là la température du matériau et le courant qui le traverse se stabilisent. La capacité d'un conducteur de transférer la chaleur qu'il produit dépend énormément de sa taille et sa forme. Ceci cause souvent des problèmes car la nécessité de produire des composantes de taille réduite rentre souvent en conflit avec la nécessité de créer une composante assez grande pour qu'elle puisse dissiper la chaleur qu'elle produit. Ceci c'est le cas des résistances, on les conçoit en grandeurs physiques différentes pour pouvoir les adapter aux différents niveaux de puissances qu'elles doivent supporter. La résistance de la plupart de matériaux conducteurs varie donc avec les changements de température. Il existe alors des formules analytiques pour calculer ces variations, connaissant donc la valeur de la résistance d'un conducteur à 0 ou 20 °C on peut calculer sa résistance à une autre température T à l'aide de la relation suivante

$$R = R_{20} [1 + \alpha_{20} (T-20)] = R_0 (1 + \alpha_0 T) \quad (5)$$

où

R: résistance à la température T

R_{20} et R_0 : résistance à 20 et 0 °C

α_{20} et α_0 : coefficients de température à 20 et 0 °C

Les coefficients α des matériaux dépendent de leur température d'utilisation et souvent on les retrouve dans des tables de physique. Alors si on connaît le coefficient α et la résistance d'un matériau à une température donnée nous pouvons trouver sa résistance à une autre température à l'aide des équations suivantes

$$R_2 = R_1 \frac{1 + \alpha_{20}(T_1 - 20)}{1 + \alpha_{20}(T_2 - 20)} = R_1 \frac{1 + \alpha_0 T_1}{1 + \alpha_0 T_2} \quad (6)$$

où

R_1 : résistance à T_1

R_2 : résistance à T_2

Tableau 3.1 Coefficients de température α des matériaux conducteurs à 0 et 20 ° C [13]

Matériau	Coeff. de température (1/°C à 0°)	Coeff. de température (1/°C à 20°)
Acier	0.0016	0.0042
Aluminium	0.0042	0.0039
Argent	0.00035	0.0038
Carbone	-	-0.0005
Constantan	-	0.000003
Cuivre	0.0046	0.00393
Étain	0.00458	0.0042
Fer	0.006198	0.005
Laiton	0.00208	0.002
Mercure	0.00068	0.00089
Molybdène	-	0.0034
Nickel	0.006	0.006
Or	0.00365	0.0034
Platine	0.0037	0.003
Plomb	0.00466	0.0041
Tungstène	0.0049	0.0045
Zinc	0.0040	0.0037

Des "Handbooks" de chimie et de physique fournissent une liste d'un bon nombre de coefficients α pour d'autres matériaux et d'autres températures. Alors, une fois qu'on a calculé la valeur de résistance à la température spécifiée on applique la formule 1. Ceci résume les méthodes possibles de calcul des pertes résistives si l'on veut tenir compte de l'effet de la température sur la résistance des conducteurs, une telle approche est valable pour un système qui est traversé par du courant continu.

3.2.3 Calcul des pertes résistives en tenant compte de l'effet pelliculaire à hautes fréquences

Pour pouvoir calculer les pertes résistives en courant alternatif il faut tenir compte de l'effet pelliculaire qui entraîne un changement dans la résistance des conducteurs dû au fait que plus la fréquence augmente dans un conducteur, plus le courant alternatif parcourant celui-ci a tendance à se concentrer à sa surface. La densité de courant décroît de façon exponentielle de la périphérie du conducteur vers son centre. On exprime cette densité de courant par

$$i_x = i_0 e^{-x/\delta} \quad (7)$$

où

i_x : densité de courant à la distance x de la périphérie

i_0 : densité de courant à la surface du conducteur ($x = 0$)

δ : profondeur de pénétration, dépendant en particulier de la fréquence

Le courant qui traverse le conducteur est donc égale à l'aire définie par les axes et la courbe représentant la densité de courant, tel qu'illustré à la figure 3.1 .

En principe l'aire O, i_0, D est égale $i_0 \delta$, c'est à dire à l'aire O, i_0, A, B :

$$I = i_0 \delta \quad (8)$$

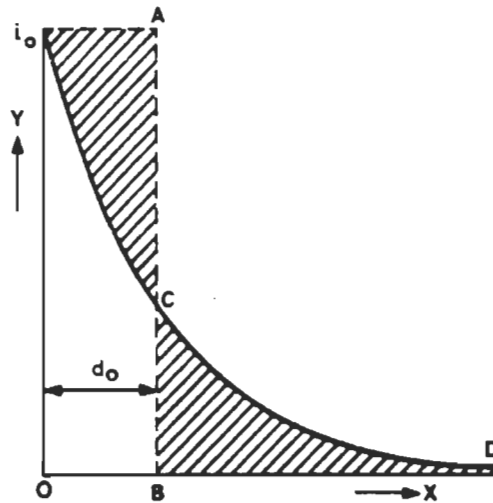


Figure 3.1 Profondeur de la pénétration du courant. [14]

Les aires CAi_0 et BCD sont égales et le courant total dans le conducteur est égale au produit de la densité de courant à la périphérie i_0 par une certaine profondeur δ appelée épaisseur de peau. Pour faciliter l'analyse du phénomène, on remplace un courant de répartition non uniforme dans le conducteur, par un courant fictif équivalent, réparti de façon uniforme dans une zone d'épaisseur δ à partir de la surface et de densité égale à sa valeur à la surface. On a alors $i(\delta) = i_0/e$, soit $0.368 i_0$ et l'intensité de courant qui parcourt la couche s'étendant de la périphérie à l'épaisseur de peau δ $I(\delta) = i_0 \delta (1 - 1/e)$

donc $I(\delta) = 0.632I$. 63% du courant est alors concentré dans la couche délimité par l'épaisseur de peau. D'après la loi de Joule la puissance dissipée est proportionnelle au carré de l'intensité de courant.

Le calcul demontre que la puissance dégagée dans la couche d'épaisseur δ est égale à :

$$P(\delta) = 0.865 P \quad (9)$$

C'est donc essentiellement dans cette épaisseur de peau que se concentre la puissance calorifique et ce phénomène conditionne la plupart des applications industrielles de chauffage par induction. Cette profondeur de pénétration (déterminée à partir des équations de Maxwell) est donnée, dans le cas d'un conducteur cylindrique plein par la formule

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \cdot 10^7}{\mu_r f}} \quad (10)$$

où

ρ : résistivité du conducteur en ohms-mètres

f : fréquence du courant en hertz

μ_r : perméabilité magnétique relative du conducteur

La densité de courant associée à l'épaisseur de peau produit une augmentation de la résistance efficace d'un conducteur et une diminution de son inductance interne également. Le premier phénomène a plus d'importance que le deuxième, surtout dans le cas des gros conducteurs qui opèrent à des fréquences industrielles, l'augmentation de cette résistance doit être sérieusement considérée. Pour ce faire, on détermine donc la résistance efficace d'un conducteur cylindrique en courant alternatif de haute fréquence R' , à l'aide de sa résistance en courant continu R par la relation suivante:

$$R' = RK \quad (11)$$

On détermine K à l'aide de la table 3.2 en termes de la valeur de x, lequel est à son tour donné par la formule

$$x = 2\pi a \sqrt{\frac{2 f \mu}{\rho}} \quad (12)$$

où a: rayon du conducteur, f: fréquence en Hertz, μ : perméabilité magnétique du conducteur (supposée constante), ρ : résistivité en abohm.cm (abohm: $10^{-9} \Omega$). Pour des calculs pratiques l'équation peut s'écrire

$$x = 0.063598 \sqrt{\frac{f \mu}{R}} \quad (13)$$

où R: résistance cc à la température d'opération en ohm/mille. La valeur de μ pour des conducteurs non-férromagnétiques (cuivre, aluminium) est de 1, pour des matériaux magnétiques, cette valeur varie selon la composition, le traitement métallurgique, la densité de courant etc., et elle doit être déterminée à l'aide de tests.

Tableau 3.2 Ratios d'effet pelliculaire. [15]

z	K	z	K	z	K	z	K
0.0	1.00000	6.6	2.60313	2.9	1.28644	17.0	6.26817
0.1	1.00000	6.8	2.67312	3.0	1.31809	18.0	6.62129
0.2	1.00001	7.0	2.74319	3.1	1.35102	19.0	6.97446
0.3	1.00004	7.2	2.81334	3.2	1.38504	20.0	7.32767
0.4	1.00013	7.4	2.88355	3.3	1.41999	21.0	7.68091
0.5	1.00032	7.6	2.95380	3.4	1.45570	22.0	8.03418
0.6	1.00067	7.8	3.02411	3.5	1.49202	23.0	8.38748
0.7	1.00124	8.0	3.09445	3.6	1.52879	24.0	8.74079
0.8	1.00212	8.2	3.16480	3.7	1.56587	25.0	9.09412
0.9	1.00340	8.4	3.23518	3.8	1.60314	26.0	9.44748
1.0	1.00519	8.6	3.30557	3.9	1.64051	28.0	10.15422
1.1	1.00758	8.8	3.37597	4.0	1.67787	30.0	10.86101
1.2	1.01071	9.0	3.44638	4.1	1.71516	32.0	11.56785
1.3	1.01470	9.2	3.51680	4.2	1.75233	34.0	12.27471
1.4	1.01969	9.4	3.58723	4.3	1.78933	36.0	12.98160
1.5	1.02582	9.6	3.65766	4.4	1.82614	38.0	13.68852
1.6	1.03323	9.8	3.72812	4.5	1.86275	40.0	14.39545
1.7	1.04205	10.0	3.79857	4.6	1.89914	42.0	15.10240
1.8	1.05240	10.5	3.97477	4.7	1.93533	44.0	15.80936
1.9	1.06440	11.0	4.15100	4.8	1.97131	46.0	16.51634
2.0	1.07816	11.5	4.32727	4.9	2.00710	48.0	17.22333
2.1	1.09375	12.0	4.50358	5.0	2.04272	50.0	17.93032
2.2	1.11126	12.5	4.67993	5.2	2.11353	60.0	21.46541
2.3	1.13069	13.0	4.85631	5.4	2.18389	70.0	25.00063
2.4	1.15207	13.5	5.03272	5.6	2.25393	80.0	28.53593
2.5	1.17538	14.0	5.20915	5.8	2.32380	90.0	32.07127
2.6	1.20056	14.5	5.38560	6.0	2.39359	100.0	35.60666
2.7	1.22753	15.0	5.56208	6.2	2.46338		
2.8	1.25620	16.0	5.91509	6.4	2.53321		

D'autres valeurs de K sont fournies dans [15] p. 4-29 pour tenir compte de l'effet de proximité entre les conducteurs. Donc une fois qu'on a trouvé la valeur de K on applique à nouveau l'équation 1 pour calculer les pertes résistives tout en tenant compte de l'effet pelliculaire sur les conducteurs qui travaillent à des hautes fréquences.

3.2.4 Calcul des pertes dans les circuits magnétiques des transformateurs et des moteurs

Les matériaux ferromagnétiques utilisés dans les machines à courant alternatif doivent en général produire le moins possible des pertes. Plus les pertes sont faibles, meilleur sera le rendement, et plus il sera permis d'élever la valeur de B_{\max} induit, ce qui a comme conséquence

directe de permettre la réduction des dimensions de construction et une réalisation plus économique. Les pertes dans les transformateurs se situent à trois niveaux:

- pertes résistives dans les bobines
- pertes par courants de Foucault
- pertes par hystérésis

Les pertes résistives dans les bobinages se calculent de la manière décrite à la section précédente. En ce qui concerne les pertes par courants de Foucault, dans la pratique courante on tente de les minimiser en réalisant le circuit magnétique à partir de tôles minces (0.3 à 0.6 mm) qui sont isolées entr'elles par une couche d'email. Le calcul de telles pertes se fait à l'aide de la formule suivante:

$$P_f = K_f V_f f^2 e^2 B_{\max}^2 \quad (14)$$

où

K_f : constante propre au tôles utilisées.

V_f : volume du fer utilisé.

f : fréquence d'opération en Hertz

e : épaisseur des tôles.

B_{\max} : valeur d'induction maximale en Tesla

Pour ce qui est des pertes par hystérésis, on tente de les limiter en utilisant des tôles ayant un certain pourcentage de silicium 0.8% à 3.5% ou en utilisant des tôles à cristaux orientés (tôles au silicium à très faible teneur en carbone). Le calcul des pertes par hystérésis se fait en intégrant le cycle d'hystérésis de chaque matériau considéré, une formule empirique est aussi utilisée à cet effet. [16]

$$P_h = K_h V_f f B_{\max}^{1.6 \text{ à } 1.8} \quad (15)$$

où

K_h : constante propre aux tôles utilisées.

V_f : volume du fer utilisé.

f : fréquence d'opération en Hertz.

B_{max} : valeur d'induction maximale en Tesla

Les pertes par courants de Foucault et par hystérésis sont souvent spécifiées comme étant les pertes dans le fer. On les exprime généralement en W/kg pour une tôle d'épaisseur donnée, une fréquence donnée ou en fonction de l'induction maximale. Pour ce faire on a recours aux méthodes graphiques la plupart du temps et les abaques qu'on utilise à cet effet sont construits par évaluation pratique plutôt que par approche analytique. L'évaluation pratique des pertes fer peut donc se faire à l'aide d'un dynamomètre ou un moteur calibré comme source test d'entraînement de la façon suivante [17]:

- (1) On mesure et enregistre la puissance mécanique requise pour entraîner un moteur ou un générateur à vide et à excitation séparée.
- (2) On connecte le moteur à une source de courant de sens contraire à l'excitation. On augmente son intensité graduellement jusqu'à ce que le champ rémanent soit annulé. Ceci peut être vérifié en mesurant le passage par zéro (ou aux alentours) de la tension induite. A ce point-ci il n'y a plus de flux efficace et on mesure à nouveau la puissance d'entrée.
- (3) Les pertes fer totales se calculent en faisant la différence entre les mesures faites à l'étape 1 et 2. Il va de soi qu'à l'aide de cette méthode nous ne pouvons pas mesurer séparément les pertes par courants de Foucault et les pertes par hystérésis car elles ont lieu de façon simultanée. La façon de les mesurer séparément est décrite à la référence [18].

Donc en règle générale, il faut se référer aux informations fournies par le fabricant des tôles pour pouvoir estimer les pertes dans les différents circuits magnétiques à l'étude. Autrement, on peut toujours estimer les pertes séparément à l'aide des équations 14 et 15.

L'abaque illustré plus bas dans la page est un exemple de méthode graphique d'estimation des pertes fer pour des tôles de 4 millièmes de pouce du type Supermendor et Silicon, à différentes fréquences et différentes valeurs d'induction magnétique.

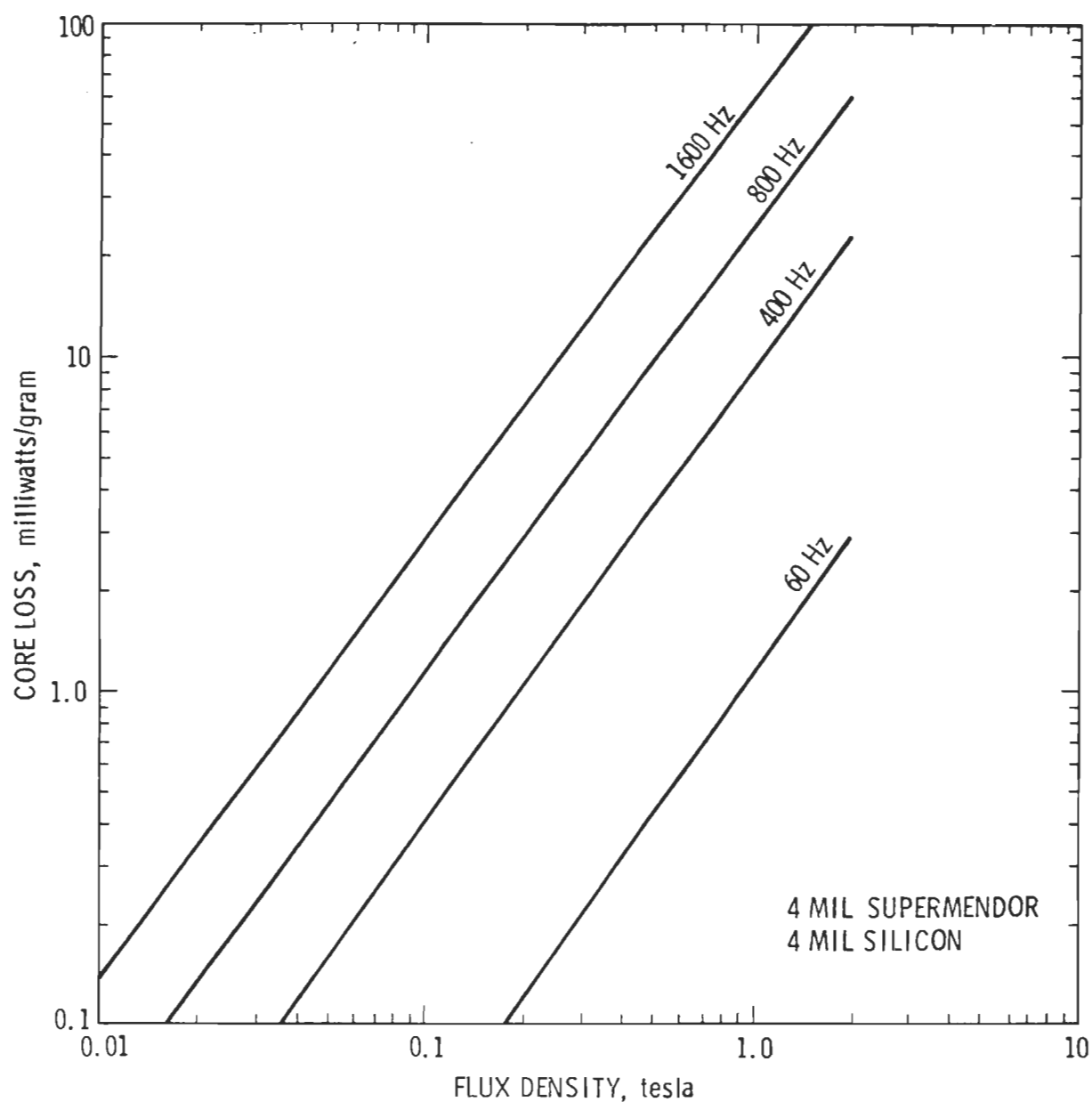


Figure 3.2 Méthode graphique de calcul des pertes fer pour des tôles de 4 millièmes de pouce SUPERMENDOR et SILICON. [19]

3.2.5 Calcul des pertes dans les composants électroniques de puissance

Plusieurs types de composants de puissance (en incluant les transistors bipolaires, les MOSFET et les thyristors) peuvent être amorcés ou bloqués en appliquant les signaux appropriés sur les bornes. Des tels dispositifs peuvent être vus comme des interrupteurs contrôlables. On les représente de façon générique à l'aide de la figure ci-bas

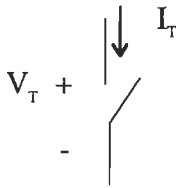


Figure 3.3 Interrupteur générique contrôlable.

Lorsque l'interrupteur est fermé, le courant peut circuler dans le sens indiqué par la flèche seulement. L'interrupteur idéal possède les caractéristiques suivantes:

1. Lorsqu'il est ouvert, il bloque des tensions positives et négatives sans qu'il ait circulation de courant.
2. Lorsqu'il est fermé, il conduit des fortes intensités de courant sans qu'il y ait de chute de tension à ses bornes.
3. Il commute de façon instantanée lorsqu'il est commandé.
4. Une faible quantité de puissance est requise pour le commander.

En pratique, les dispositifs de commutation ne possèdent pas ces caractéristiques et par conséquent ils dissipent une certaine puissance lorsqu'on les utilise. S'ils en dissipent beaucoup ils vont s'auto-détruire et détruire à la fois d'autres composantes du système. La puissance de dissipation dans les dispositifs de commutation est de nature générique, c'est à dire les mêmes principes s'appliquent à tous les dispositifs de la même manière. Pour comprendre ce principe on peut se référer à la figure 3.4, ceci représente une situation typiquement rencontrée en électronique de puissance, le courant qui circule dans l'interrupteur doit aussi circuler dans une

inductance en série. La source équivalente de courant continu I_o représente le courant qui circulerait à cause de l'énergie emmagasinée dans l'inductance. Lorsque l'interrupteur conduit la diode est polarisée à l'inverse et le courant circule à travers le semi-conducteur. Lorsque l'interrupteur est ouvert, I_o circule à travers la diode et on retrouve la tension V_d aux bornes du semi-conducteur en supposant qu'il n'y a pas de chute de tension sur la diode idéale.

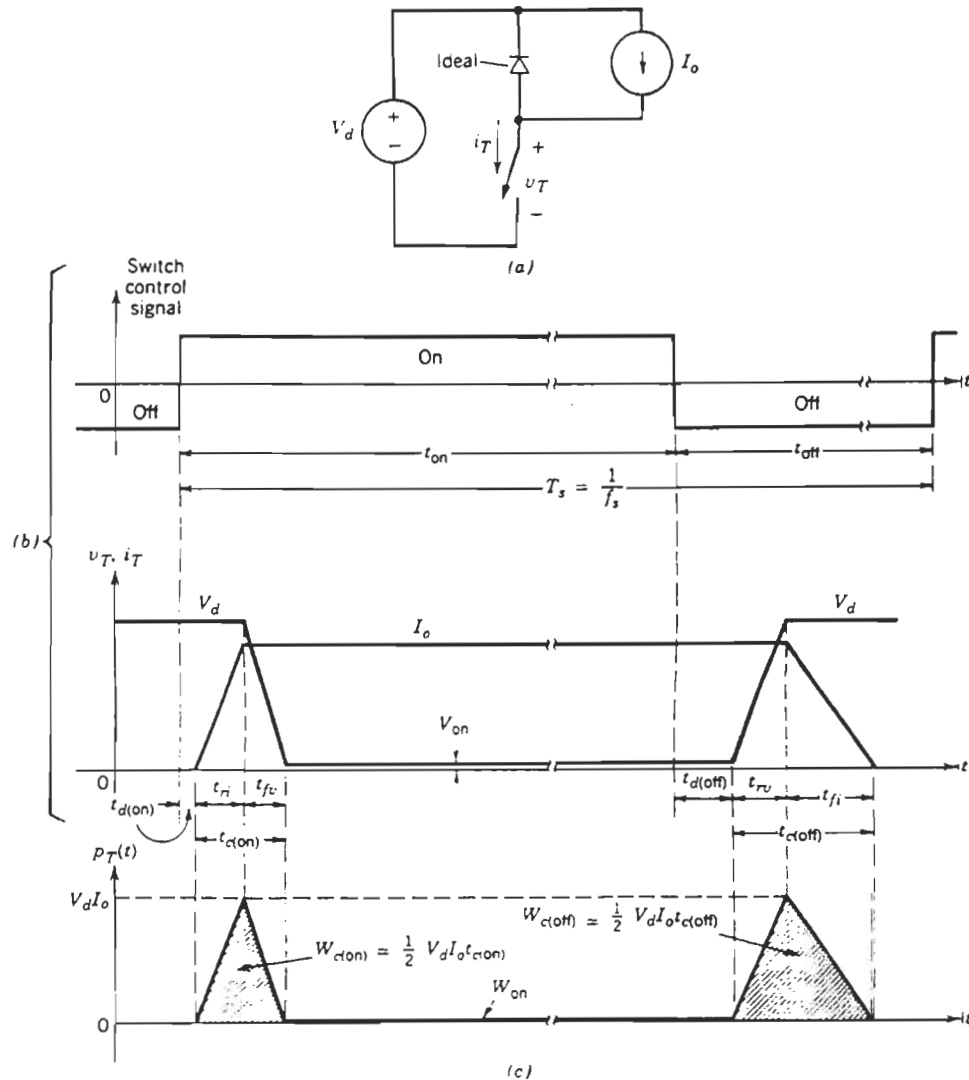


Figure 3.4 Caractéristiques des commutations génériques linéarisées: (a) circuit inductif de commutation simplifié, (b) formes d'onde de commutation, (c) puissance instantanée de commutation. [20]

La figure 3.4 montre également les formes d'onde du courant et de la tension sur l'interrupteur lorsque celui-ci opère à une fréquence $f_s = 1/T_s$. T_s la période de commutation. Ces formes d'ondes sont des approximations linéaires des formes d'ondes réelles. Lorsque l'interrupteur est bloqué, on l'amorce à l'aide d'un signal de contrôle positif approprié. Pendant la transition d'amorçage il s'écoule un temps $t_{d(on)}$ ou délai et un temps de montée t_{ri} avant que I_0 circule à travers le dispositif. C'est à partir de ce moment que la diode est polarisée à l'envers et que la tension sur l'interrupteur descend à la valeur V_{on} , après un temps de descente t_{fv} . On peut aussi voir sur la figure 3.4 (b) que de fortes valeurs de courant et de tension se produisent simultanément pendant l'intervalle de transition $t_{c(on)} = t_{ri} + t_{fv}$. L'énergie dissipée dans le dispositif pendant ce temps de transition peut être calculée de façon approximative par la formule

$$W_{c(on)} = \frac{1}{2} V_d I_0 t_{c(on)} \quad (16)$$

Une fois que l'interrupteur conduit, la valeur de V_{on} est d'à peu près 1 volt ou plus selon le dispositif. Le temps de conduction est normalement plus grand que le temps de transition d'amorçage et de blocage. L'énergie dissipée pendant la période de conduction est donnée par

$$W_{on} = V_{on} I_0 t_{on} \quad (17)$$

Pour bloquer l'interrupteur, on applique un signal négatif aux bornes de celui-ci. Après un délai $t_{d(off)}$ la tension commence à monter à nouveau pendant un temps de montée t_{rv} jusqu'à la valeur V_d , la diode est donc polarisée directement et elle commence à conduire du courant. Le courant dans l'interrupteur tombe graduellement à zéro avec un temps de descente de t_{fi} . A nouveau, de fortes valeurs de tension et de courant se produisent de façon simultanée dans l'interrupteur pendant la période de transition $t_{c(off)} = t_{rv} + t_{fi}$.

L'énergie dissipée dans l'interrupteur pendant cet intervalle de temps est donnée par

$$W_{c(off)} = \frac{1}{2} V_d I_o t_{c(off)} \quad (18)$$

L'énergie de dissipation associée à l'intervalle de temps $t_{d(off)}$ est négligeable par rapport à $W_{c(off)}$. La figure 3.4 (c) illustre en dernier la forme d'onde de la puissance instantanée de dissipation $P_T(t) = V_T I_T$. La valeur moyenne approximative des pertes associées à la commutation est donnée par

$$P_S = \frac{1}{2} V_d I_o f_s [t_{c(on)} + t_{c(off)}] \quad (19)$$

Celui-ci est un résultat qui montre que les pertes par commutation dans les semi-conducteurs varient de façon linéaire avec la fréquence et les temps de commutation. Une autre contribution majeure aux pertes dans les semi-conducteurs est celle de la puissance moyenne dissipée pendant la période de conduction

$$P_{on} = V_{on} I_o f_s t_{on} \quad (20)$$

Le courant de fuite associé au blocage étant très petit, on néglige en pratique les pertes associées à la non-conduction. La puissance moyenne totale dissipée dans un semi-conducteur est donc la somme de P_S et P_{on} .

3.2.6 Calcul des pertes dans les composants microélectroniques

La puissance dissipée dans les circuits intégrés se calcule de manière approximative d'après le nombre de broches de sortie des différentes composantes. Toutefois, la plupart du

temps la valeur de la puissance de dissipation des différents circuits est donnée par le fabricant. Dans le cas contraire on peut la déduire à partir de la relation suivante

$$P_{typ} = V_{cctyp} \cdot I_{cctyp} + (pinout \cdot P_{sortie}) \quad (21)$$

P_{sortie} est considérée comme étant la puissance totale dissipée lorsqu'une broche est activée ou désactivée, cette valeur se calcule à l'aide de la tension V_{ol} et le courant I_{ol} (de sortie) de niveau bas

$$P_{sortie} = V_{(ol)typ} \cdot I_{(ol)typ}. \quad (22)$$

Ce raisonnement s'applique à la plupart des boîtiers de plastique, de céramique et autres types de montages.

3.2.7 Calcul du coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle

Le transfert par convection naturelle se produit au contact entre un corps qui chauffe et un fluide à l'état gazeux ou liquide. Suite au contact le fluide subit une augmentation locale de température, il prend de l'expansion, sa densité diminue et il devient plus léger. Une différence de densité locale dans un champ gravitationnel entraîne à son tour un courant de déplacement convectif vers le haut. C'est donc de cette forme que de la chaleur est transmise et transportée vers des niveaux de plus haute densité de fluide. La force de déplacement de la convection naturelle n'est pas très grande car elle dépend du changement de densité locale dans le fluide et aussi des obstacles et de la résistance que l'écoulement convectif rencontre dans son chemin. Ce mode de transfert de chaleur est donc plus efficace dans un système ouvert. Le calcul du coefficient de convection naturelle se fait à l'aide de la relation suivante

$$Q = hA(T_s - T_a) \quad (23)$$

où

Q: Chaleur totale transmise par convection naturelle (Watts)

h: Coefficient de convection naturelle associé à l'écoulement. (Watts/m²°C)

A: Aire de la surface refroidie. (m²)

T_s: Température de surface. (°C)

T_a: Température ambiante. (°C)

Le modèle de coefficient de convection choisi est le suivant:

$$\bar{h} = \frac{k \overline{Nu}_1}{L} \quad (24)$$

où

\bar{h} : coefficient de convection (Watts/ m²°C)

k: conductivité thermique du fluide (Watts/m°C)

\overline{Nu}_1 : nombre de Nusselt qui exprime le ratio entre la résistance thermique et la résistance convective du fluide. Sans dimensions.

L: Longueur caractéristique des surfaces refroidies. (m)

Le nombre de Nusselt se calcule par la relation

$$\overline{Nu}_1 : 0.59 (Gr_1 Pr)^{0.25} \quad (25)$$

si l'écoulement de refroidissement est laminaire lorsque

$$10^4 < Gr_1 Pr < 10^9$$

et

$$\overline{Nu}_1 : 0.129 (Gr_1 Pr)^{0.33} \quad (26)$$

si l'écoulement de refroidissement est turbulent lorsque

$$10^9 < Gr_1 Pr < 10^{12}$$

où

Gr_1 : Nombre de Grasshof qui exprime le ratio entre les forces de poussée d'Archimède et les forces de viscosité. Sans dimensions.

$$Gr_1 : \frac{g\beta(T_s - T_a)L^3}{\mu} \quad (27)$$

g : accélération gravitationnelle	m^2/s
β : coefficient d'expansion thermique volumique	$1/^\circ C$
T_s : Température de surface	$^\circ C$
T_a : Température ambiante	$^\circ C$
L : longueur caractéristique de la surface refroidie	m
μ : coefficient de viscosité dynamique	m^2/s

Pr : Nombre de Prandtl qui exprime le ratio entre la diffusivité moléculaire et la diffusivité thermique du fluide de refroidissement. Sans dimensions.

$$Pr : \frac{\mu C_p}{k} \quad (28)$$

C_p : chaleur spécifique du fluide	$J/Kg.^\circ C$
k : conductivité thermique du fluide	$Watts/m.^\circ C$

La longueur caractéristique des surfaces à l'étude se détermine d'après la direction que le fluide prend lorsqu'il passe sur la surface qui chauffe

TABLE 3.3 Longueurs caractéristiques de certaines surfaces [21]

Surface	Position	Longueur caractéristique
Plan rectangulaire	Verticale	Hauteur, limitée à 2 pieds
Plan non-rectangulaire	Verticale	Aire
Plan circulaire	Verticale	<div> <div>Largeur horizontale</div> <div>$\frac{\pi}{4} \times \text{Diamètre}$</div> </div>
Cylindre	Verticale	Hauteur, limitée à 2 pieds
Plan	Horizontale	<div> <div>$2(\text{Largeur} \times \text{Longueur})$</div> <div>Largeur + Longueur</div> </div>
Cylindre	Horizontale	Diamètre
Sphère		Rayon

Dans le cas d'une plaque verticale, on peut obtenir le coefficient de convection simplifié à l'aide de la relation suivante:

$$h_c = 0.29 \left(\frac{\Delta t}{L} \right)^{0.25} \quad (29)$$

Δt étant la différence de température en °F entre la plaque qui chauffe et l'air ambiant et L la longueur caractéristique d'écoulement en pieds. Les unités de h_c sont des $\frac{\text{Btu}}{\text{hr} \cdot \text{pi}^2 \cdot ^\circ \text{F}}$ pour obtenir des $\frac{\text{Watts}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ \text{C}}$ on multiplie par le facteur 0.324084

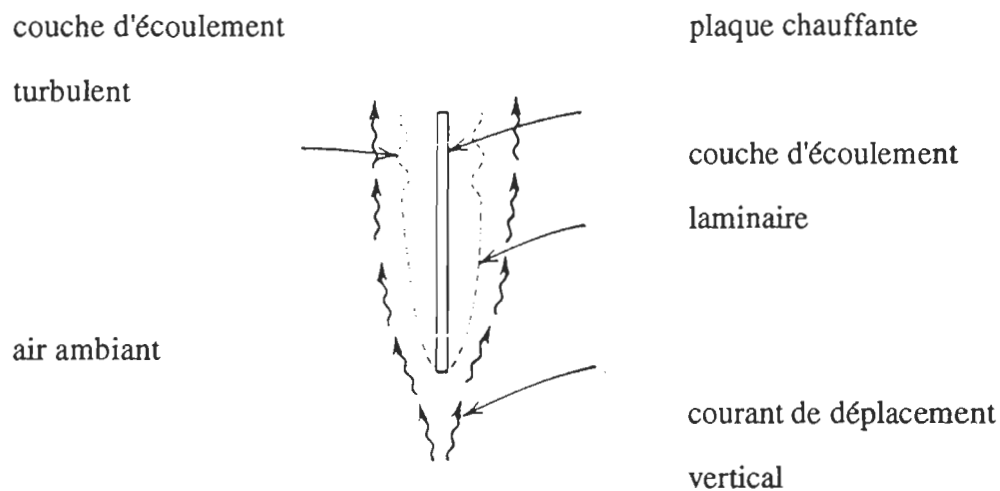


Figure 3.5 Profil de convection naturelle sur une plaque verticale. [21]

Le coefficient de convection naturelle définit les caractéristiques thermiques de la couche de fluide qui est en contact direct avec la plaque et qui restreint le transfert direct de chaleur vers l'air ambiant. L'écoulement laminaire a lieu au bas de la plaque et la transition du régime laminaire au régime turbulent commence en théorie à une distance de 2 pieds à partir du bas. Lorsqu'il s'agit de plaques horizontales il faut considérer deux scénarios possibles. Celui d'une

plaque horizontale qui transmet de la chaleur vers le bas et celui d'une plaque qui transmet de la chaleur vers le haut. Les deux scénarios possibles ne permettent pas le transfert de la chaleur à part égale, bien que nous soyons portés à croire le contraire. La représentation graphique par des flèches de la façon dont l'écoulement d'air se fait dans chaque cas, peut nous permettre de comprendre intuitivement pour quoi les deux scénarios de transfert de chaleur par convection naturelle n'ont pas le même effet de refroidissement.

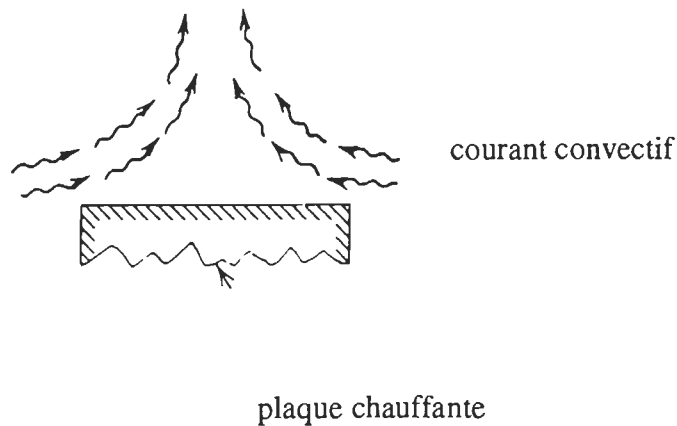


Figure 3.6 Plaque chauffante horizontale placée vers le haut. [21]

Le coefficient de convection naturelle simplifié dans le cas d'une plaque chauffante placée vers le haut se calcule comme suit:

$$h_c = 0.27 \left(\frac{\Delta t}{L} \right)^{0.25} \quad (30)$$

Lorsque la plaque chauffante est placée vers le bas l'air doit circuler le long du bord inférieur vers les coins opposés avant qu'un courant de déplacement vers le haut s'établisse, tel que montré plus bas. Ceci se traduit par une augmentation de la résistance à l'écoulement et par une diminution de l'effet total de refroidissement.

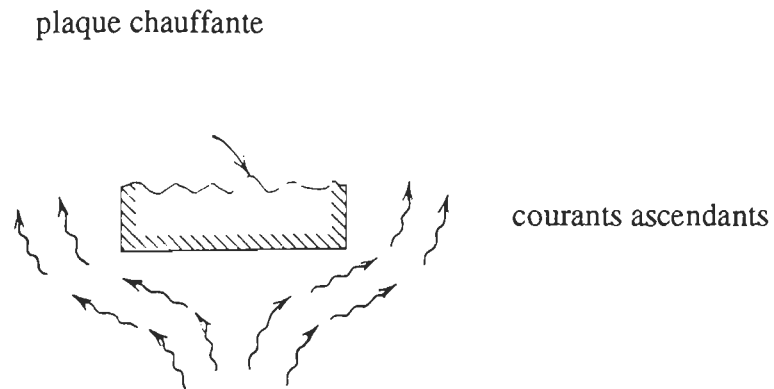


Figure 3.7 Plaque chauffante placée vers le bas. [21]

Le coefficient de convection simplifié dans le cas d'une plaque chauffante horizontale placée vers le bas se calcule comme suit:

$$h_c = 0.13 \left(\frac{\Delta t}{L} \right)^{0.25} \quad (31)$$

Tel que montré à la figure 3.5 la turbulence peut se produire à partir d'une certaine distance en ascendant sur une plaque chauffante, lorsque le régime d'écoulement est laminaire au tout début. Toutefois, le régime d'écoulement peut être turbulent dès le début si la différence de température

entre la surface chauffante et le milieu ambiant est pour ainsi dire assez grande. Le coefficient de convection naturelle devient à ce moment:

$$\text{Pour des plaques verticales:} \quad h_c = 0.19 \Delta t^{0.333} \quad (32)$$

$$\text{Pour des plaques horizontales:} \quad h_c = 0.22 \Delta t^{0.333} \quad (33)$$

A titre d'exemple, déterminons à l'aide des équations 30 et 32 la différence de température requise pour que le régime d'écoulement laminaire, sur une plaque chauffante verticale de 1 pied d'hauteur, devienne turbulent.

$$0.29 \left(\frac{\Delta t}{1} \right)^{0.25} = 0.19 D^{0.333}$$

$$\frac{\Delta t^{0.333}}{\Delta t^{0.25}} = 1.526; \Delta t^{0.083} = 1.526 \quad \Delta t = 163 \text{ } ^\circ\text{F ou } 72.77 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pour une plaque plus petite que 1 pied la différence de température devra être plus grande pour que le même phénomène se produise.

3.2.8 Calcul du coefficient de transfert de chaleur par radiation

Ce deuxième mode transfert de chaleur est différent, car il se fait sans qu'il y ait de contact entre le corps qui chauffe et son environnement. En effet, ce type de transfert de chaleur se fait même dans le vide. D'après les lois de physique, tout corps qui se trouve à une température supérieure au zéro absolu (-273 °C) émet des ondes électromagnétiques de plusieurs longueurs qui voyagent à la vitesse de la lumière. L'énergie transférée par ce type de radiation dépend de la température absolue du corps émetteur, des caractéristiques de finition de sa surface, de sa géométrie, du matériau dont il est fait et dans le cas des métaux, du degré d'oxydation. Chaque type de matériau possède alors un coefficient d'émissivité, lequel est le ratio entre l'énergie émise par un corps quelconque et l'énergie émise par un corps noir parfait. Ce coefficient est toujours

plus petit que 1 car en pratique il n'existe pas de corps noir parfait dans la nature. On utilise alors la notion de corps noir comme étalon pour comparer les caractéristiques de radiation des autres corps. Le tableau 3.4 montre les valeurs du coefficient d'émissivité de plusieurs matières

Tableau 3.4 Émissivité typique à 100° C. [21]

Matière	Émissivité, e
Acier poli	0.06
Aluminium poli	0.06
Aluminium en feuille	0.09
Aluminium anodisé	0.81
Argent	0.02-0.032
Caoutchouc	0.86-0.94
Cuivre poli	0.023-0.052
Eau (32-212°F)	0.95-0.96
Fer poli	0.14-0.38
Fonte	0.44
Laiton poli	0.06
Or poli	0.018-0.035
Plomb	0.28
Vitre	0.85-0.95
Zinc galvanisé en feuille	0.23

La mise en équation du transfert de chaleur par radiation se fait à l'aide de l'expression suivante:

$$Q = \sigma f_{1-2} e A (T_1^4 - T_2^4) \quad (41)$$

où

Q = Chaleur totale transmise (Watts)

σ : constante de Stefan-Boltzman égale à $5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{Watts}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ \text{K}^4}$

f_{1-2} facteur de forme entre la surface 1 et 2. Sans dimensions

e : émissivité du matériau

A : aire de la surface émettrice

T_1 : température de la surface émettrice ($^\circ\text{K}$)

T_2 : température de la surface réceptrice ($^\circ\text{K}$)

Lorsque le transfert de chaleur s'effectue il faut tenir compte des deux aspects; le facteur d'émissivité équivalent et le facteur de forme. La table 3.5 à la page suivante nous donne le facteur d'émissivité équivalent pour plusieurs configurations possibles.

Table 3.5 Facteur d'émissivité équivalent pour différentes configurations. [21]

Configuration	facteur équivalent e
Plans parallèles infinis	$\frac{1}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1}$
Surface 1 entourée par une autre 2	$\frac{1}{\frac{1}{e_1} + \frac{A_1}{A_2} \left \frac{1}{e_2} - 1 \right }$
Petite surface 1 encerclée par une autre 2	e_1
Cas général de deux surfaces	$e_1 \cdot e_2$

Pour des surfaces irrégulières on considère leur projection sur le plan d'incidence. Le facteur de forme f_{1-2} quant à lui se définit comme étant la fraction de radiation omnidirectionnelle émise par la surface 1 qui est interceptée par la surface 2. Le facteur de forme f_{1-2} n'est pas égal au facteur de forme f_{2-1} mais ils sont reliés par l'expression

$$A_1 f_{1-2} = A_2 f_{2-1} \quad (42)$$

Plusieurs méthodes numériques et plusieurs équations ont été développées pour essayer de calculer le facteur de forme entre deux surfaces en fonction de leur géométrie, mais le processus est souvent fort compliqué. Parfois il est plus conseillé d'essayer de faire une estimation de ce facteur que de chercher à le connaître exactement.

En théorie, l'obtention du membre gauche de l'équation 42 se fait par intégration comme suit:

$$A_1 f_{1-2} = \iint \frac{\cos \phi_1 \cos \phi_2 dA_1 dA_2}{\pi r^2} \quad (43)$$

ϕ_1 et ϕ_2 étant l'angle entre les vecteurs dA_1 et dA_2 et la distance r qui relie ensemble les deux éléments de surface.

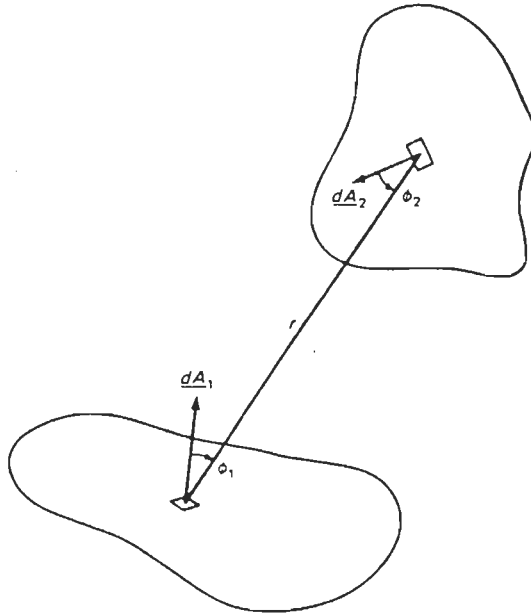


Figure 3.8 Géométrie d'échange de radiation entre deux surfaces. [22]

Il va de soi que l'évaluation de l'intégrale double n'est pas toujours facile. Une des méthodes le plus couramment utilisées pour faire une approximation du facteur de forme entre deux surfaces est celle des cordes de Hottel qui se croisent, tel qu'illustré à la page suivante.

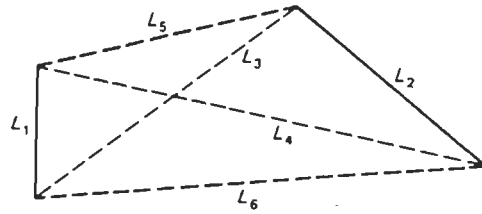


Figure 3.9 Géométrie utilisée pour la méthode des cordes qui se croissent. [22]

L'évaluation du facteur de forme par cette méthode se fait à l'aide de l'équation suivante:

$$f_{1-2} = \frac{(L_3 + L_4) - (L_5 + L_6)}{2L_1} \quad (44)$$

On utilise également les méthodes graphiques pour le calcul du facteur de forme de deux configurations en particulier, celle de deux plaques parallèles et deux plaques perpendiculaires. Les figures 3.10 et 3.11 à la page suivante nous montrent comment appliquer les deux méthodes graphiques mentionnées.

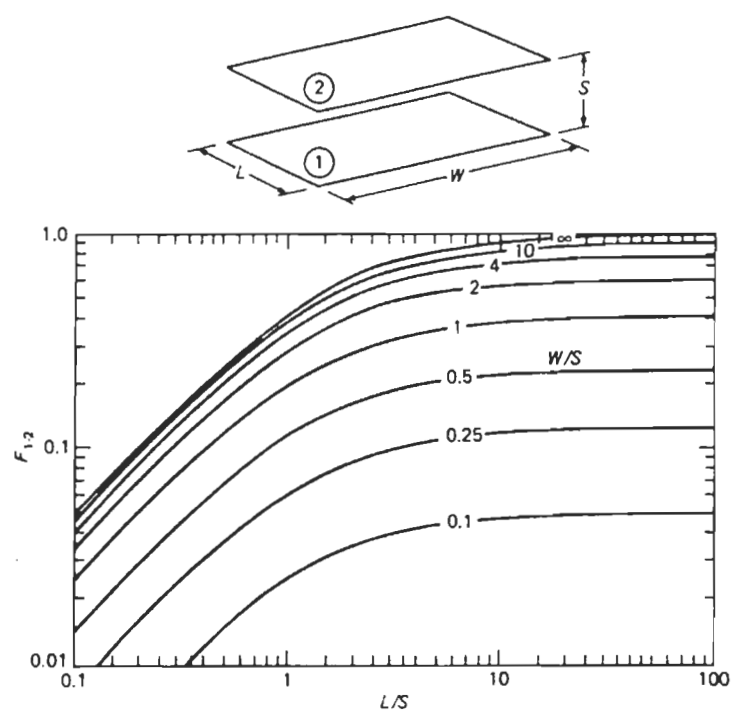


Figure 3.10 Facteur de forme pour deux plaques parallèles. [22]

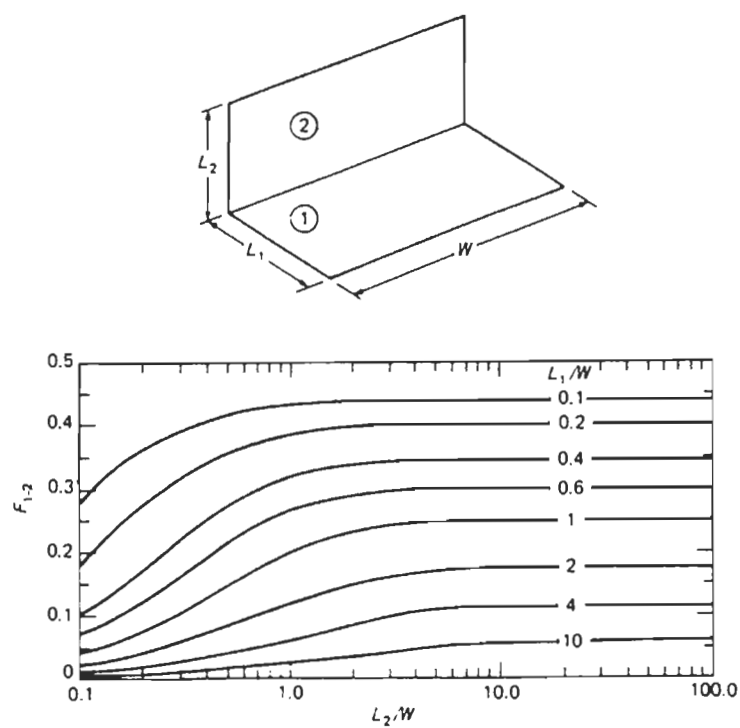


Figure 3.11 Facteur de forme pour deux surfaces perpendiculaires. [22]

Si au lieu de vouloir connaître la quantité totale de chaleur transmise par radiation on veut connaître le coefficient de transfert de chaleur par radiation on peut utiliser la relation suivante pour le trouver en supposant que le transfert s'effectue comme suit

$$Q_r = f_{1-2} \epsilon h_r A_1 (T_1 - T_2) \quad (45)$$

en égalant cette équation à l'équation 41, on obtient après manipulation

$$h_r = \frac{\epsilon f_{1-2} s \left[\left(\frac{T_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2 + 273}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2} \quad (46)$$

Cette expression nous donne des valeurs de h_r en $\frac{\text{kWatts}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$ même si les températures de surface en autant que les températures du numérateur sont données en $^\circ\text{Kelvin}$, ce qui n'est pas le cas si on voulait exprimer le taux de transfert [23]. Donc à l'aide de l'équation 46 nous pouvons construire des méthodes graphiques en fonction de la différence de température entre deux surfaces pour obtenir une approximation du coefficient de transfert de chaleur par radiation.

3.3 Stratégie d'implantation d'une banque de connaissances bibliographiques en électrothermie

La création d'une banque de connaissances purement bibliographiques en électrothermie est de grande importance car comme cela avait déjà été mentionné, les connaissances dans le domaine se trouvent éparpillées un peu partout et presque aucune initiative a été prise jusqu'à présent pour tenter de les ressembler sous une forme quelconque. Les connaissances académiques sur les phénomènes de transfert de chaleur et de transformation de l'énergie en chaleur sont plus ou moins bien répertoriées à travers de volumes, "Handbooks" et certains ouvrages spécialisés. Bien qu'on en parle de façon sommaire dans la plupart des publications, certains sujets sont à

peine abordés. Malgré ceci l'accessibilité à l'information électrothermique sous une forme théorique est pour ainsi dire acceptable. Toutefois les connaissances pratiques sur la mesure expérimentale et l'évaluation de certains paramètres associés aux phénomènes d'échanges et certaines propriétés thermiques des matériaux, ne sont pas toujours disponibles. Il existe en effet très peu de littérature sur la mesure pratique des coefficients suivants:

- le coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle ou convection forcée.
- le coefficient de transfert de chaleur par radiation
- le coefficient d'émissivité des matériaux communément utilisés dans la construction des systèmes électriques, électroniques et électromécaniques.
- les coefficients de dilatation thermique et les coefficients de Poisson des différents matériaux, alliages et matériaux composites.
- le flux de chaleur etc.

Deux organismes ont été rejoints pour solliciter de l'information sur ce volet et sur l'électrothermie en général, le Comité Canadien des Électrothéchnologies et La Société Française des Thermiciens. Le premier organisme nous a fourni une liste de 1412 documents, parmi lesquels nous avons pu repérer plusieurs ouvrages qui peuvent faire partie de la base de connaissances que nous nous proposons de bâtir. Le deuxième organisme a aussi fourni des informations qui peuvent être classées avec la même optique. Malgré cela il ne nous a pas été facile de repérer de la littérature sur les méthodes de mesure expérimentale des coefficients mentionnés auparavant.

La stratégie d'implantation d'une banque de connaissances en électrothermie est alors la suivante; il s'agit en premier lieu de ressembler le plus possible de références sur l'électrothermie et ses domaines connexes, que ce soit sous forme de volume, de valeurs tabulées, de "Handbook", d'articles, de mémoires de maîtrise ou autres. Une fois répertoriées ces références nous pouvons créer une base de données à l'aide de l'application dBASE III. À l'aide de cellules

nous pouvons enregistrer les publications avec le nom de l'auteur ou des auteurs, le titre, la maison d'édition, l'année de publication ainsi qu'un commentaire sur le contenu des références. Plusieurs rubriques pourront ainsi être créées pour mieux cerner les différents sujets répertoriés, par la suite il s'agira de créer une application .knb à l'aide du système expert pour avoir accès à cet base de connaissances bibliographiques par le biais de la programmation par objets. C'est la meilleure option possible car LEVEL5 OBJECT a été configuré pour être compatible avec les bases de données créées en dBASE III entre autres. Plusieurs options peuvent être rendues disponibles à l'utilisateur à partir de l'application système expert, comme par exemple celle de rajouter ou d'enlever des références, d'avancer vers la référence suivante ou de revenir sur la référence précédente. Il suffit de créer quelques méthodes WHEN CHANGED et les associer à des boutons poussoir pour pouvoir naviguer dans la base des connaissances bibliographiques en électrothermie.

3.4 Stratégie d'implantation pour la conception d'une interface de communication entre LEVEL5 OBJECT et le code de simulation numérique nisa386

Comme cela avait déjà été mentionné à la section 2.3, le seul code de simulation numérique que nous pouvons accéder à partir du système expert est la version PC de NISA c'est-à-dire nisa386, une fois que l'application est résidente dans le PC sur lequel LEVEL5 OBJECT a été installé. Les autres codes numériques résident dans des stations de travail qui opèrent dans un environnement UNIX. La version de coquille qui est disponible pour le moment a été conçue pour opérer dans un environnement WINDOWS, voilà ce qui limite l'accès et la communication avec toutes les applications disponibles au laboratoire d'électrothermie.

Donc pour établir une première communication avec nisa386 à partir de LEVEL5 OBJECT il suffit de créer deux méthodes WHEN CHANGED, dont une pour charger nisa386 et une autre pour l'édition des fichiers .nis.

Voici comment on procède:

- Charger LEVEL5 OBJECT pour ouvrir une nouvelle application .knb. En activant le menu FILE à l'aide de la souris on choisit NEW et suite à cela les icônes de programmation s'activent en prenant de la couleur.

- Activer le menu RULE TALK et choisir l'option OBJECTS, ceci nous permet de créer une nouvelle classe qu'on peut appeler "communication". À l'aide de l'éditeur de classes nous créons deux attributs simples pour cette nouvelle classe

[S] charger nisa

[S] édition de fichier

et on quitte après ça l'éditeur d'objets

- Activer à nouveau le menu RULE TALK et choisir l'option DISPLAYS, ceci nous renvoie dans l'éditeur d'affichages pour nous permettre de créer un affichage principal dans lequel nous pouvons créer les objets graphiques nécessaires pour bâtir l'application du type knb. En premier lieu il faut créer un bouton -poussoir en activant le menu TOOLS et en choisissant l'option "Pushbutton". À l'aide de la souris on dessine le contour des dimensions qu'on veut donner au bouton-poussoir. Un bouton-poussoir apparaît ensuite dans l'affichage et pour l'identifier il faut activer le menu ATTRIBUTES. On nomme le premier bouton-poussoir comme on veut par l'entremise de l'option "Instance Name". Toujours dans le même menu on choisit l'option "Label" pour illustrer l'objet créé avec le texte "activer nisa386". En dernier il faut choisir l'option "Attachment", ceci nous renvoie dans l'éditeur de Methods/Rules/Demons et une fois dedans on active le menu SELECT pour choisir l'option "All When Changed Methods". En activant le bouton NEW il faut procéder à écrire la méthode WHEN CHANGED suivante:

WHEN CHANGED

BEGIN

ESTABLISH "IPU, EXTERN, nisa386.exe"

END

La méthode qui vient d'être créée s'enregistre en pesant sur le bouton SAVE de l'éditeur de méthodes et en associant la méthode à l'attribut **[S] charger nisa** de la classe "communication". On ferme ensuite l'éditeur des méthodes, cet action nous renvoie à l'éditeur d'affichages et nous continuons à créer d'autres outils pour compléter l'application du type knb.

L'outil et la méthode qui viennent d'être créés servent à lancer nisa386 à partir de l'application knb dans LEVEL5 OBJECT. En suivant les mêmes démarches il est nécessaire de créer un deuxième bouton-poussoir et une deuxième méthode WHEN CHANGED pour pouvoir éditer un fichier .nis. La version PC de NISA ne permet pas d'éditer facilement un fichier .nis. Pour palier à cette difficulté, il faut passer par un bon éditeur de texte, comme WORD de WINDOWS. Pour ce faire on crée un deuxième bouton-poussoir qu'on étiquette "édition nisa" et qu'on associe à la méthode suivante:

WHEN CHANGED

BEGIN

ESTABLISH "IPU, EXTERN, winword.exe"

END

Pour sauver cette méthode on l'associe à l'attribut **[S] édition de fichier** de la classe "communication". Nous pouvons rajouter des outils du type TEXTBOX pour finir d'illustrer l'affichage principal, de la même manière nous pouvons créer deux autres boutons-poussoir pour contrôler l'exécution de l'application .knb, dont un pour sortir qu'on associe à l'attribut [s] exit de la classe "application" et un autre pour retourner au début de l'application. Ce dernier on l'associe à l'attribut **[S] restart** de la classe "application". Tout en restant dans l'éditeur des fenêtres d'affichage il faut activer le menu DISPLAYS et choisir l'option Attributs, suite à cela on déclare la page d'affichage qui vient d'être créée comme étant un "wait display" en activant la case appropriée. Par défaut cette page d'affichage porte le nom de Display 1, nous pouvons la nommer à notre guise. En remontant dans le menu nous procédons à construire une autre page d'affichage

que nous allons déclarer comme étant le "title display". Nous pouvons y insérer les outils graphiques qu'on veut, mais il faut surtout en créer deux. Un bouton-poussoir pour sortir de l'application tel que décrit plus haut et un autre bouton-poussoir pour connecter l'affichage titre et l'affichage principal. Pour ce faire il suffit de créer un bouton-poussoir et choisir l'option "Display Attachment" dans le menu ATTRIBUTS de l'éditeur de DISPLAYS. Ceci nous renvoie dans une fenêtre où tous les affichages sont listés. Il faut donc choisir l'affichage Display 1. Le bouton-poussoir ainsi créé peut être étiqueté "continuer". À l'aide de l'icône en forme de disquette ou du menu FILE nous pouvons enregistrer finalement l'application .knb sous le nom de nisa.knb. En l'exécutant le premier affichage que nous verrons à l'écran est celui du "Title Display", nous pouvons choisir de quitter en activant le bouton de sortie ou de continuer en activant le bouton étiqueté "continuer". Une telle action nous renvoie à l'affichage principal où nous avons le choix de charger nisa386 ou d'éditer un fichier .nis également.

3.5 Implantation des algorithmes d'optimisation thermique

L'implantation des algorithmes d'optimisation thermique, dans la pratique de l'électrothermie, se fait par des méthodes heuristiques et surtout stochastiques. En général ceci se fait au niveau de la simulation numérique des systèmes pour être appliqué par la suite dans une configuration réelle. Pour pouvoir appliquer les méthodes heuristiques et les méthodes stochastiques il est nécessaire d'établir des critères à l'aide desquels lesdites méthodes peuvent nous aider à trouver les extremums d'une fonction ou de la valeur d'une variable. Le plus, il s'agit de la température dans le cas de l'optimisation électrothermique. On utilise donc à cet effet des méthodes stochastiques telles que la méthode de réduction de variance de Monte-Carlo [23], la méthode des réseaux partiels (cluster method) et bien d'autres approches étroitement liées aux méthodes de simulation et d'intégration numérique.

Un logiciel a été même développé pour l'optimisation thermique au Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes du Centre National de la Recherche Scientifique de

Toulouse en France. Ce logiciel porte le nom de THTHOM et son utilisation est décrite à la référence [24].

La plupart du temps l'optimisation thermique se fait par le biais du positionnement efficace des composantes d'un système à l'étude. Au niveau de la simulation numérique ceci s'accomplit en modifiant la géométrie d'un modèle et le maillage de ce dernier, ce qui implique en quelque sorte de modifier la position des noeuds des éléments à chaque fois qu'un nouveau maillage est généré. Suite à quoi il faut lancer une nouvelle simulation numérique pour visualiser les résultats de la nouvelle configuration produite. À l'aide des modèles stochastiques il est possible d'établir des relations entre la position et la température qui permettent par la suite de trouver les extremums recherchés. Le tout ne se fait pas encore de façon automatique et simultanée. Il va de soi que toutes les étapes de calcul requises ne se font pas avec les mêmes outils. Il faut attendre les résultats de simulation numérique pour pouvoir exécuter les méthodes stochastiques et la présence d'un expert dans le domaine est aussi requise pour coordonner le tout. En résumé, l'implantation des méthodes d'optimisation thermique se fait encore des nos jours avec beaucoup d'incertitude et imprécision à la fois. La pratique d'une telle technique a besoin d'être améliorée de façon considérable. La technologie associée aux systèmes experts peut apporter une solution à ce problème, sauf que pas dans l'immédiat car pour pouvoir résoudre de façon intelligente un problème d'une telle envergure, il est nécessaire de faire appel à un système expert qui va être en mesure d'exécuter une tâche de façon récursive en ayant comme antécédents l'imprécision et l'incertitude. Ce ne sont pas tous les systèmes experts disponibles sur le marché qui permettent une telle marge de manoeuvre et LEVEL5 OBJECT fait partie de la grande majorité. Les versions de systèmes experts qui réussissent à intégrer la théorie des ensembles flous et l'approche probabiliste sont les seuls à être en mesure de fournir une solution intelligente appropriée au problème d'optimisation thermique. Il faut toutefois mentionner que ces systèmes sont encore en train d'être développés. Il faudra attendre quelque temps avant qu'ils deviennent plus accessibles.

L'optimisation électrothermique est une technique pour ainsi dire à caractère multi-tâches et pour qu'un seul outil de calcul puisse la réaliser, l'outil en question doit être capable d'intégrer la théorie des éléments finis et la théorie des modèles stochastiques. À la référence [25] on décrit comment on a utilisé une version de système expert pour résoudre un système d'équations différentielles par la méthode des éléments finis. On décrit également comment on a utilisé la théorie des ensembles flous pour générer un maillage triangulaire à deux dimensions du domaine de définition des équations différentielles en tenant compte également des conditions aux frontières. L'application comme telle n'est pas commerciale évidemment et elle requiert l'utilisation d'une station SUN, un VAX 11-780 et un superordinateur CYBER 205. Une telle approche peut sûrement servir à accomplir la tâche d'optimisation thermique. L'implantation d'une telle application sur un ordinateur personnel n'est pas envisageable pour le moment, compte tenu des ressources requises et de l'ampleur du problème. Pour arriver à une solution réaliste et efficace par l'entremise de l'intelligence artificielle il faudra bâtir un système expert seul et exclusivement à ces fins. L'architecture parallèle permettra sûrement dans le futur de simplifier davantage les techniques d'optimisation thermique et autres.

3.6 Applications reliées aux systèmes de mesure

À l'aide du prototype de système expert que nous développons pour cette recherche il est beaucoup plus facile qu'auparavant de manipuler et d'emmagasinier les différentes données thermiques générées par les systèmes de mesure conventionnels. Les données numériques sont faciles à manipuler à l'aide de fichiers écrits en dBASE III, ceci était déjà pratique courante avant l'arrivée des coquilles de développement. Les images thermiques générées par thermographie infrarouge et les fichiers de résultats des simulations numériques sont rendus plus accessibles qu'autrefois, grâce à la commercialisation d'applications graphiques disponibles sur l'environnement WINDOWS. Avant, il fallait photographier les écrans cathodiques ou faire l'impression des fichiers graphiques pour en faire différents usages. Actuellement il suffit d'avoir

les applications Paintshop Pro ou Paint Brush et le logiciel de compression Ghostscript pour traiter presque tout ce qui se produit comme fichier image.

3.6.1 Mesure thermique par caméra Infrarouge

La mesure par infrarouge est une des techniques essentielles dans la pratique et l'application des principes de l'électrothermie. Nous avons utilisé à maintes reprises le module THERMOVISION 900 d'AGEMA. Son module de contrôle permet d'emmagasiner les captations thermiques, les histogrammes et les profils de température sous forme de fichiers TIFF, GIFF ou PCX. Le système expert quant à lui permet de manipuler des images BMP ou bitmap et pour traduire des fichiers image générés à l'aide de l'AGEMA 900 il suffit de les copier sous leur forme originelle (TIFF, GIFF ou PCX) et les coller dans un fichier créé à l'aide de Paintshop Pro ou de Paint Brush. À partir de là l'image peut être éditée à noter guise, nous pouvons lui rajouter ou lui enlever des éléments et une fois finie l'édition de l'image il faut la sauvegarder sous forme de fichier bitmap. C'est tout ce qui est requis comme démarche pour que LEVEL5 OBJECT puisse traiter les résultats de l'appareil de mesure thermographique AGEMA 900.

Pour établir une communication plus étroite avec le système de mesure thermographique les choses se compliquent car l'interface interne du contrôleur prévue à cet effet a été développée dans une plate forme X-Windows. Pour le moment seul les systèmes qui roulent sur UNIX peuvent établir un protocole de communication avec le système de mesure thermographique et ceci c'est le cas des stations de travail et des ordinateurs du type "mainframe".

3.6.2 Les systèmes multimédia et leur utilité dans le développement d'un système expert en électrothermie

Les systèmes multimédia sont d'une utilité énorme pour exprimer des idées ou des concepts sous forme d'animation audiovisuelle. Grâce aux techniques de digitalisation de l'image, il est aujourd'hui possible de manipuler des séquences vidéo aussi facilement que l'on manipule des fichiers texte ou des objets graphiques.

Autrefois seul les ateliers d'édition et de production vidéo étaient en mesure de manipuler les signaux vidéo de la même façon qu'on le fait avec les systèmes multimédia, à une différence près toutefois, les maisons d'édition travaillaient par le passé avec des signaux analogues et cela impliquait l'utilisation des appareils suivants:

- des appareils d'enregistrement et de reproduction pour des formats de supports magnétiques analogues tels que le 1 pouce pour les stations de télédiffusion, le 3/4 de pouce, le HI-8 ou 8mm professionnel, le Betamax et le VHS.
- des consoles de mixage telles que la A&B roll.
- des moniteurs TV.
- des unités de synchronisation (House Sync)
- des unités de correction de signal du type TBC (Time Base Corrector)
- des générateurs de caractères et bien d'autres.

Le VIDEO TOASTER d'Amiga est une des premières applications commerciales de digitalisation de l'image qui utilisait le support magnétique numérique et la micro-électronique pour faire l'intégration de presque toute la quincaillerie nécessaire à la production et à l'édition vidéo. Dans ses débuts le coût d'acquisition d'une unité de traitement était assez énorme, \$12.000 dollars canadiens approximativement. Pour moins que cela on peut en ce moment se procurer des systèmes multimédia qui permettent la manipulation des images vidéo à partir d'un PC sans qu'on ait à se procurer de toute la quincaillerie décrite auparavant, seul l'espace mémoire est une des limitations de cette nouvelle technologie. Ceci est dû au fait que les séquences vidéo se font à une cadence de trente images par seconde. La présence d'un CD-ROM ou un disque optique est plus que souhaitable pour qu'un système multimédia soit complet et efficace.

Les systèmes multimédia peuvent avoir une utilisation pratique dans le développement d'un système expert dans la mesure que ce dernier ait à transmettre aux usagers des connaissances

ou des explications dans une forme autre que par fenêtre graphique ou par fenêtre texte. Parfois il est préférable de représenter un objet dans sa forme réelle que par un dessin approximatif, comme il est aussi préférable de donner des directives avec la chronologie et les sons appropriés. Une image statique et de longs textes à lire n'attirent pas l'attention et ne motivent pas toujours les personnes à qui nous voulons adresser un message. En plus de ceci une description textuelle d'un objet ou un système quelconque se prête à toutes sortes d'interprétations de la part des personnes à qui le message s'adresse, la perception diffère évidemment d'un individu à l'autre. Dans le cas du prototype de système expert qu'on tente de développer, les systèmes multimédia peuvent être utilisés pour les situations suivantes (et plusieurs autres évidemment) :

- Créer des séquences d'animation de l'évolution des régimes transitoires des systèmes étudiés, à l'aide de l'appareil de mesure thermographique. Ceci peut s'avérer pratique pour l'estimation en temps réel de la constante thermique d'un système et d'autres diagnostics.
- Former des usagers sur les techniques de modélisation avec les différents codes de simulation numérique.
- Former des usagers sur les techniques de mesure thermique et sur les techniques de mesure expérimentale des coefficients de transfert de chaleur et des propriétés thermiques des matériaux.

Deux systèmes multimédia ont été étudiés pour utilisation future, le VIDEO for Windows et le VideoSpigot for Windows.

3.6.2.1 Le système multimédia VIDEO for Windows

VIDEO for Windows est un système multimédia de la compagnie Microsoft qui permet entre autres de:

- Compresser et synchroniser des images vidéo pour la reproduction de celles-ci à partir d'un disque dur ou d'un port CD-ROM.
- Couper, copier et coller de l'information audio et vidéo à partir et vers le Clipboard de l'environnement Windows.

- Intégrer des images vidéo dans toute application qui supporte le protocole OLE (objects linking and embedding).
- Faire jouer des séquences vidéo à l'aide de Microsoft Media Player de la version 3.1 de Windows.
- Faire jouer virtuellement des séquences vidéo dans un PC doté d'un processeur 386 sx ou d'une version supérieure dans un environnement Windows 3.1, sans qu'aucune interface vidéo et aucune quincailerie de décompression soit nécessaire.
- Lancer des séquences vidéo dans des applications Windows à l'aide des icônes activés par la souris.

Pour pouvoir faire l'acquisition d'images à l'aide de VIDEO for Windows et pour pouvoir les reproduire il est nécessaire d'avoir:

- Un ordinateur personnel doté d'un processeur version 386 sx/16 ou une d'une version supérieure qui opère dans un environnement Windows 3.1.
- Un disque dur de 50 megabytes ou plus
- Une carte de son compatible avec Windows
- Un écran cathodique VGA 256 couleurs ou plus.
- Des sources vidéo telles qu'un VTR (Video tape recorder) ou un magnétoscope VCR , un videodisc ou toute autre source de vidéo composite.
- Une souris

Les options suivantes sont aussi recommandées:

- Un port CD-ROM pour reproduction des images contenues dans la librairie Video Clip, on recommande la version Multimedia PC.
- Un disque dur à grosse capacité pour emmagasiner les images vidéo numérisées.
- Un coprocesseur video.

3.6.2.2 Le système multimédia VIDEOSPIGOT for Windows

Ce système est manufacturé par la compagnie Creative Labs et à l'instar de VIDEO for Windows il permet de faire de captations vidéo à partir de sources VTR, VCR, Videodisc, un écran de télévision etc. et de les convertir en données numériques. Sa composante matérielle principale est le Digital Video Frame Grabber et ses composantes logicielles principales sont un logiciel de compression de vidéo numérique et le logiciel VIDEO for Windows basé sur la technologie AVI (Audio-Video Interleaved). Le VideoSpigot permet de:

- Faire des captations en temps réel d'images numériques en format YUV 4:2:2 et de les emmagasiner sur un disque dur ou autre.
- Traiter plusieurs standards de vidéo composite (NTSC, PAL, SECAM) à travers d'un connecteur RCA.
- Traiter des sources Super-VHS dans les standards NTSC, PAL et SECAM à travers d'un connecteur DIN.
- Capturer des images individuelles avec une résolution 640x480 pixels et de les emmagasiner sous forme de fichier DIB.
- Reproduire des séquences vidéo en utilisant VIDEO for Windows, avec une résolution de jusqu'à 320x240 lignes. L'affichage des séquences vidéo peut se faire sur des fenêtres qu'on peut déplacer, réduire et agrandir. L'affichage peut se faire en couleurs de jusqu'à 24 bits dépendant de la carte graphique installée.
- Compresser les images à l'aide du logiciel CODEC jusqu'à un ratio de 20:1 sans perte virtuelle de la qualité de l'image, comparativement à leur forme originale de fichier AVI à 24 bits.

Pour opérer efficacement VideoSpigot requiert:

- Un ordinateur personnel compatible IBM avec un 386DX ou une version supérieure qui opère à 33 MHz ou plus.
- Un environnement Windows 3.1 ou une version supérieure.
- 8 Megabytes de RAM.
- Un disque dur de 80 Megabytes.

- Un système d'exploitation MS-DOS 5.0 ou une version supérieure.
- Un port ISA à 16 bits.
- Une carte audio MPC-compatible comme celles du type Sound Blaster.
- Un écran VGA, SVGA ou VESA et leurs cartes graphiques correspondantes compatibles en Windows.

CHAPITRE IV

ÉTUDE DES SYSTÈMES DE DÉVELOPPEMENT

4.1 Généralités

Depuis la commercialisation des systèmes de développement, un bon nombre de versions sont disponibles sur le marché. L'accessibilité actuelle à la technologie associée aux systèmes experts permet aujourd'hui aux utilisateurs potentiels d'avoir un certain choix dans les outils qui répondent aux besoins spécifiques de leurs applications. Mais ce ne sont pas toutes les coquilles ou les outils de développement qui conviennent à toutes applications. Certains outils parmi la gamme disponible requièrent la connaissance des langages de cinquième génération, d'autres pas. La représentation des connaissances peut différer également d'un système à un autre, l'environnement de programmation peut être parfois Windows ou d'autres fois Unix ou un autre, bref il existe beaucoup de similitudes entre les systèmes experts mais leur fonctionnalité ne s'adapte pas toujours aux différentes applications qu'on veut en faire. Un des derniers critères de classement des systèmes experts est celui de leur utilité dans la résolution des problèmes de tous les jours [25]. Un système peut alors appartenir à la classe un s'il est d'utilisation commune et il a gagné l'acceptation de la communauté d'utilisateurs. Dendral, Macsyma et R1 sont des exemples de cette classe. Dans la classe deuxième nous retrouvons des systèmes assez performants en soi mais qui n'ont pas encore gagné l'acceptation populaire. Ce sont en général des systèmes experts pour la consultation et le diagnostic qui n'ont pas la capacité de pouvoir expliquer leurs raisonnements à la satisfaction des usagers. Internist/Caduceus, MYCIN, CASNET et PUFF/Centaur sont des exemples pour cette catégorie de deuxième classe. Finalement dans la dernière catégorie nous retrouvons les systèmes qui sont incapables d'atteindre un niveau de performance d'un vrai expert et qui ont gagné une acceptation limitée au sein de la communauté d'utilisateurs. AM, Hearsey I et II sont les meilleurs exemples de cette troisième catégorie. Paradoxalement des systèmes comme Hearsey I et II ont fait de grandes contributions à

l'avancement de la technologie associées aux systèmes experts. Dans les paragraphes qui suivent quelques systèmes de développement sont décrits plus en détail pour donner un aperçu des outils qui sont disponibles sur le marché.

4.1.1 ART (Automated Reasoning Tool)

Son développement a été commencé en 1979 en langage InterLISP. La version actuelle de ART est une application en CommonLISP. ART est conçu pour être utilisé dans les applications de grosses versions de systèmes experts, et il comprend: un langage de représentation des connaissances, un compilateur de base de connaissances, un moteur d'inférence, l'outil de synthèse ARTIST et l'outil ART Studio. Ces composantes sont le produit de l'intégration de la programmation par règles, la représentation symbolique des connaissances, la programmation logique, la programmation par objets, le raisonnement non-monotonique et des interfaces usager, le tout contenu dans une architecture simple. Quelques unes des représentations des connaissances sont uniques à ART et ne sont pas supportées par d'autres outils commerciaux.

Le mécanisme de base pour représenter les objets et les classes dans ART est une structure appelée "schéma". Un schéma est une collection de faits sur les objets qui possède la capacité d'hériter. ART possède une façon unique de traiter l'aspect d'envoi de messages associé à la programmation par objets et il utilise son langage de règles à cet effet. La principale option ou caractéristique de ART est celle de la structure "view point" qui permet de supporter une variété de stratégies de résolution de problème, telles que le raisonnement hypothétique, la dépendance logique, la temporisation des connaissances et la modélisation en tableau (blackboard). Du point de vue fonctionnel, un "view point" est une collection explicite d'éléments extraits de la base des connaissances et leurs valeurs à un temps donné ou à un état intermédiaire de l'exécution d'une application. Ceci permet de comprendre, sous forme d'arborescence, le raisonnement hypothétique utilisé pour arriver à la solution d'un problème. Pour traiter les hiérarchies view point, ART utilise les raisonnements Deep first et Breadth first avec des contraintes fixées à

priori. ART peut conseiller d'enlever des branches improductives d'une structure viewpoint. Un autre concept important dans ART est celui des faits. Un fait est une unité fondamentale qui a deux composantes; une proposition et un viewpoint. Une proposition est intuitivement reconnue par la plupart des gens comme un fait tel que "Ce bureau est ouvert". Toutefois ART permet d'inclure la perspective à partir de laquelle la proposition peut être regardée. Cet aspect de fait est explicite dans ART par l'association d'un viewpoint avec sa préposition. Un fait complet dans ART peut être le suivant; "Ce bureau est ouvert les mercredis", les mercredis représente l'étendu dans lequel la préposition est valide. De la même manière les viewpoints sont utilisés comme des mécanismes de définition pour les faits et aussi pour supporter le raisonnement hypothétique et temporel. Les faits représentent des unités individuelles de connaissances, tandis que les schémas sont utilisés pour représenter des taxonomies (une famille, un genre, une espèce, un groupe). Les schémas peuvent être vus comme des mécanismes pour décrire un ensemble de faits qui représentent un objet ou une classe d'objets qui partagent certaines propriétés

Une autre option versatile de ART est son système de règles de plusieurs types, chacun ayant un rôle spécifique dans le processus d'inférence . ART permet également d'intégrer le chaînage arrière et avant au niveau de règle. Il n'est pas nécessaire d'invoquer le mécanisme de chaînage arrière procéduralement car ART est capable de générer des buts (goals) de façon automatique lorsqu'ils sont nécessaires.

Dans ART, les patrons (patterns) sont utilisés pour spécifier une collection possible d'objets data en décrivant leur structure commune. Les patrons contiennent des variables à des endroits où les objets data sont permis de différer. De cette manière les patrons décrivent une condition générale que plusieurs ensembles différents de faits peuvent satisfaire. Une autre manière de comprendre les patrons est celle de les regarder comme des prépositions avec des variables. Les patrons peuvent inclure des opérateurs de quantification logique, des prédicats arbitraires et des instructions procédurales codées en LISP. Une règle est donc implantée comme

une combinaison d'un patron et d'une action. Le patron représente un ensemble quelconque de conditions qui doivent exister dans la base de connaissances, avant que ART puisse proposer de prendre l'action spécifiée dans la règle. ART utilise alors le concept de but (goal) pour fournir le mécanisme d'association d'antécédent de règle (patron) avec ses conséquences associées. Les buts sont des objets data représentés explicitement qui peuvent être traités par des règles de la même façon que les faits. ART utilise aussi les buts pour guider son mécanisme de chaînage arrière.

Plusieurs types de règles permettent aux utilisateurs d'avoir accès à un mécanisme versatile pour mouler et influencer l'inférence et le contrôle associé au processus de résolution de problème. ART supporte le raisonnement monotonique et non-monotonique. La capacité de raisonner à l'aide du chaînage arrière est conçu pour supporter la notion de dépendance logique. C'est à dire, ART enregistre les évidences qui suggèrent une solution de problème particulière et il est capable de tirer des conclusions ou de rejeter l'évidence qui, plus tard, peut être déclarée fausse. Ceci permet aussi le raisonnement avec incertitude. L'intégration de toutes ces options fait de ART un outil sophistiqué en soi. En plus de ses capacités de résolution de problème, le logiciel possède un environnement de développement qui comprend des outils pour le design et le debugage d'applications et pour le développement d'interfaces graphiques.

L'interface usager multifenêtres de ART possède un ensemble d'outils et d'options, tels qu'un système assez compréhensible d'aide, un outil de visualisation de la base de connaissances, un outil de visualisation de l'exécution d'une application, un système de commande d'entrée sur clavier qui supporte l'abréviation des commandes et la correction d'orthographe, un menu accessible par souris et une option graphique pour la création d'interfaces. Les deux outils qui supportent ces options sont ART studio et ARTIST (ART Image Synthesis Tool). ART studio possède les outils nécessaires à la visualisation de la base de connaissances et pour la visualisation de l'exécution d'une application. ARTIST est un outil interactif pour bâtir des interfaces usager. L'éditeur graphique de ARTIST permet le design de fenêtres, la construction

et l'animation d'icônes et la création de librairies d'icônes. ARTIST comprend aussi des outils pour bâtir des menus organisés hiérarchiquement et des interpréteurs de lignes de commande. La version courante de ART en commonLISP est disponible sur les stations TI Explorer LISP, les machines Symbolics LISP, les machines LMI Lambda LISP et l'ordinateur DEC AI VAX. De futures versions rouleront sur des PC IBM, des stations SUN et certaines machines UNIX.

4.1.2 EXYS

EXYS est un outil pour développer des systèmes experts qui comprend trois programmes principaux écrits en langage C, EXYS, EDITXS et SHRINK. Ceci permet une exécution plus rapide et une utilisation moindre de l'espace mémoire. EXYS est le programme principal qui contrôle la base de connaissances. EDITXS est un éditeur qui peut être utilisé pour générer des bases de connaissances. SHRINK quant à lui est un programme utilitaire qui sert à optimiser l'utilisation d'une base de connaissances, il peut par exemple se servir du module FASTER pour raccourcir le temps d'exécution d'une large base des connaissances quand le besoin s'impose.

EXYS est conçu pour opérer sur des ordinateurs personnels pouvant accommoder jusqu'à 5000 règles s'il y a assez d'espace mémoire pour le permettre. Le système supporte la méthode de représentation des connaissances sous forme de règles avec une structure IF (condition) THEN (action). Le moteur d'inférence raisonne par chaînage arrière et par chaînage avant. Sa base de connaissances peut être interfacée avec des systèmes et des bases de données externes telles que les bases de données et le feuilles de calcul. Le système de développement est facile d'utilisation en soi et ne requiert aucune compréhension des langages de cinquième génération comme LISP ou PROLOG. L'utilisateur peut aussi interroger EXYS sur une pièce d'information en particulier et sur comment l'information est utilisée pour arriver à une conclusion donnée. Ceci est possible grâce à sa capacité d'analyse de sensibilité. Pendant une séance d'analyse de sensibilité, une réponse à une interrogation du système est changée tout en gardant les autres constantes. Le

système produit une conclusion pour chaque cas et l'utilisateur peut faire autant de tests WHAT IF qu'il désire.

EXYS permet également à l'utilisateur d'associer un facteur de certitude aux faits et aux événements. Ces facteurs de certitude peuvent être inclus aussi dans les règles et les conclusions. S'il existe plus qu'une réponse pour un problème donné, EXYS peut associer un degré de certitude à chaque réponse et les arranger dans un ordre de ressemblance. Différentes échelles sont utilisées à cet effet dont celle de 0 et 1 pour le rejet et l'acceptation, l'échelle de 0 à 10 pour représenter un faux et un vrai absolu, les valeurs entre les deux représentent des degrés de certitude. Finalement une échelle de 0 à 100 est utilisée à l'instar de l'échelle de 0 à 10 sauf qu'elle permet plus de résolution pour spécifier le degré de certitude ou le facteur de confiance.

4.1.3 KEE (Knowledge Engineering Environnement)

KEE est une implantation de système expert en langage InterLisp conçue pour opérer sur des ordinateurs comme le Xerox 1100, les séries Symbolics 3600 et le TI Explorer. KEE permet d'accommoder quatre schémas différents de représentation des connaissances, les cadres, les objets, les règles et les procédures. Son moteur d'inférence peut raisonner autant par chaînage arrière que par chaînage avant. La méthodologie utilisée pour représenter les objets et ses attributs est celle de la structure réseau. Les objets sont organisés avec une certaine hiérarchie de façon à permettre ceux de niveau inférieur d'hériter des attributs de ceux d'un niveau supérieur. De la même manière les attributs peuvent être descriptifs ou à procédure (subroutines). Cette méthode de représentation des connaissances est unique en soi car elle permet à tous les objets de communiquer entr'eux par l'envoi et la réception de messages.

Le moteur d'inférence porte le nom de Rule System 2, cette dernière permet beaucoup de flexibilité dans le design et l'écriture des règles de même que le debuggage à l'aide des séances graphiques. La création de bases de connaissances se fait de deux façons:

- Par l'utilisation de menus à partir desquels on choisit des commandes à l'aide d'une souris.
- Par l'utilisation dans langage propre à KEE appelé TellandAsk.

KEE possède un interface graphique très puissante appelée ActiveImages qui sert à représenter les objets et leurs attributs et à invoquer des méthodes. Toutes les images créées pour représenter un objet ou une base de connaissances peuvent être réunies dans un panneau de nom Image Panel. Le système de développement fut conçu en principe pour le génie génétique, dans l'actualité il est considéré comme un outil de développement d'usage général.

4.1.4 PICON (Proccess Intelligent CONtrol)

PICON appartient à une nouvelle classe de coquilles de systèmes experts qui ont été conçues pour faire l'intégration de la technologie associée aux systèmes experts et la technologie de l'automatisation des systèmes. PICON (Proccess Intelligent CONtrol) est un outil pour le développement de systèmes experts en temps réel dans le domaine du contrôle des procédés. Il permet la représentation des connaissances sous forme de règles et sous forme de représentations schématiques. Le système opère sur la machine LISP Lambda/PLUS. Cette machine LMI est quant à elle connectée à un système de contrôle de procédés.

PICON est composé de quatre éléments; un moteur d'inférence, une base de connaissances, une interface usager appelée AI-BASE et un logiciel écrit en C appelé RTIME (Real-Time Intelligent Machine Environement) qui donne la capacité à PICON de contrôler des procédés en temps réel.

Le moteur d'inférence de PICON utilise le chaînage arrière et avant pour faire des recherches à travers les règles, générer des conclusions et guider le processeur LISP et RTIME dans l'accomplissement d'une tâche ou la génération de messages d'alarme pour l'opérateur.

AI-BASE est un programme qui permet à l'utilisateur de développer et d'éditer une base de connaissances. Il est composé de trois blocs:

- AI-PARSE, qui permet l'analyse de la syntaxe relationnelle de chaque règle générée.
- TRANSLATE-PARSE, qui permet de traduire les règles générées en langage LISP.
- AI-DBMS, à l'aide duquel les règles et les données sont emmagasinées et extraites de la base de connaissances.

La base de connaissances du système a deux composantes: une représentation schématique d'un procédé à contrôler et une représentation sous forme de règles des heuristiques utilisées par l'opérateur du système de contrôle. Les connaissances schématiques sont créées à l'aide de menus et d'une interface graphique. Une souris est utilisée pour sélectionner les icônes qui représentent les composantes d'une chaîne d'usine et pour faire d'autres dessins additionnels. Les règles quant à elles possèdent une structure hiérarchique primaire et secondaire. Les règles premières sont utilisées pour des contrôles périodiques, tandis que les règles secondaires sont utilisées pour des fins précises. Elles doivent en plus être activées par les règles primaires. Les règles dans PICON ont une structure IF THEN ou WHENEVER THEN, de même qu'elles peuvent commencer par les mots clés ACTIVATE, FOCUS, DIAGNOSE et SUSPECT.

L'interface RTIME permet d'avoir accès à des procédés en temps réel par l'entremise d'un processeur MC68010 dans la machine LMI Lambda/PLUS. RTIME peut faciliter l'acquisition et la transmission d'un bon nombre de données à des fréquences précises et ceci jusqu'à concurrence de 20.000 mesures sur des endroits différents. La gestion de données se fait évidemment de façon parallèle à l'aide d'algorithmes et de fonctions d'inférence spécifiées par le processeur LISP. Pour cela l'information est gardée dans une mémoire partagée à laquelle ont accès RTIME et le processeur LISP.

4.2 Essai préliminaire avec un système existant

Tel que décrit tout au long de ce travail LEVEL5 OBJECT (version 2.5) est la coquille qui a été choisie pour faire un essai préliminaire de développement d'un système expert en

électrothermie. Un total de six applications knb ont été conçues pour faire le calcul des coefficients décrits à la section 3.1. Chaque application peut être lancée après chargement de LEVEL5 OBJECT dans l'ordinateur personnel du laboratoire d'électrothermie. Pour chaque cas traité, les coefficients à calculer ont été définis comme des classes ou des objets dont les attributs représentent les différents paramètres qui rentrent dans les calculs. Suite à cela les des boutons-poussoir, des fenêtres de texte et des images Bitmap (bmp) ont été créées pour bâtir les affichages des applications. La figure 4.1 illustre la façon dont les affichages ont été créés.

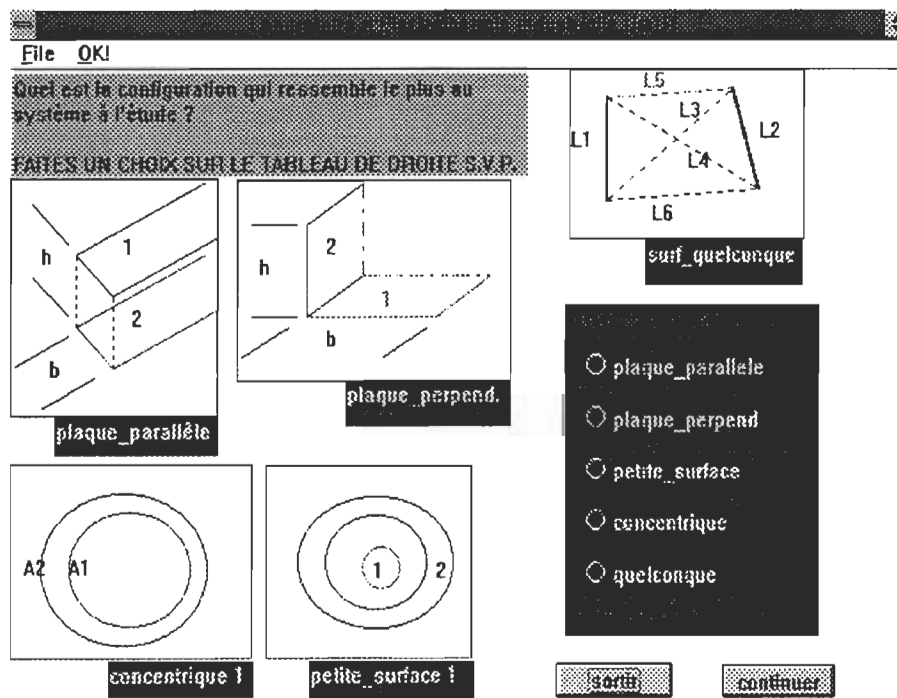


Figure 4.1 Affichage de dialogue.

Des actions ont été associées à l'activation des objets graphiques par l'entremise de l'exécution de règles et l'exécution de méthodes WHEN CHANGED. Les images bitmap utilisées pour illustrer les différents affichages ont été créées tout premièrement avec le logiciel Word de Microsoft et pour les convertir en fichiers bitmap nous avons utilisé l'application Paint Brush de Windows. Ceci résume en quelque sorte la façon dont chaque application a été configurée.

Il vaut la peine de mentionner que chaque fichier knb est un fichier binaire exécutable par LEVEL5 OBJECT, pour visualiser sous forme de texte le contenu du fichier nous devons le convertir en fichier PRL ou fichier source. Ceci se fait à l'aide du menu File en choisissant l'option Export to PRL.

4.2.1 Le fichier pertes.knb

Le calcul des pertes dans les conducteurs s'effectue à l'aide de ce fichier, l'utilisateur doit fournir le courant dans le conducteur et sa résistance, suite à cela une fenêtre d'affichage demande à l'utilisateur s'il veut tenir compte de l'effet de la température pour le calculs des pertes de dissipation dans le conducteur. Dans l'affirmative une autre fenêtre graphique demande les paramètres nécessaires pour un tel calcul. Autrement une autre fenêtre graphique demande à l'utilisateur s'il veut tenir compte de l'effet pelliculaire dans le calcul des pertes. Dans l'affirmative une fenêtre graphique demande aussi à l'utilisateur les informations nécessaires à un tel calcul, autrement le calcul de la puissance de dissipation se fait sans tenir compte d'aucun effet mentionné auparavant.

4.2.2 Le fichier toles.knb

Le fichier toles.knb a été créé pour le calcul des pertes dans les circuits magnétiques des transformateurs et des moteurs. En premier lieu une fenêtre graphique demande à l'utilisateur le type de pertes qu'il désire calculer, soit les pertes par courants de Foucault ou les pertes par hystérésis. Le choix se fait à l'aide de boutons-poussoirs, lesquels après être activés nous renvoient dans d'autres affichages où l'utilisateur doit fournir les paramètres nécessaires pour chaque calcul.

4.2.3. Le fichier semicon.knb

Le calcul des pertes dans les semi-conducteurs se fait à l'aide de l'application semicon.knb. Un affichage principal offre la possibilité à l'utilisateur d'effectuer des calculs ou de sortir. Si on choisit de poursuivre avec les calculs, l'affichage d'interrogation numérique (numeric query display) demande à l'utilisateur les caractéristiques de commutation du semi-conducteur une par une et en dernier une fenêtre d'affichage est utilisée pour fournir le résultat du calcul. Cette application a été construite surtout en définissant des objets à l'aide du domaine, ceci évite d'avoir à créer beaucoup de fenêtres d'affichage pour faire l'acquisition des attributs numériques utilisés dans le calcul des pertes par commutation.

4.2.4 Le fichier ic.knb

Le calculs génériques de la puissance de dissipation dans les circuits intégrés se fait à l'aide de cette application. L'information requise pour faire un calcul approximatif de cette puissance se trouve en partie dans les fiches techniques du manufacturier. L'autre partie de l'information est déterminée par les conditions d'opération qu'on veut imposer aux semi-conducteurs. Il est donc nécessaire de connaître des données à priori pour pouvoir obtenir un résultat concluant avec le fichier ic.knb. Encore une fois les objets pour cette application ont été créés à l'aide de la classe domaine.

4.2.5 Le fichier convec.knb

Ce fichier est utilisé pour faire le calcul du coefficient de convection naturelle pour différents types de profils de surface. L'utilisateur choisit au début le type de profil de surface et il rentre ensuite la température de surface et la température ambiante du profil à l'étude ainsi que sa longueur caractéristique. Un bouton poussoir peut être activé pour calculer le régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) associé à un tel système, finalement un autre bouton-poussoir peut être activé pour le calcul du coefficient de transfert de chaleur. Des fenêtres

graphiques (text box) sont utilisées pour donner des directives à l'utilisateur également sur comment rentrer les données.

4.2.6 Le fichier radiat.knb

Le coefficient de transfert de chaleur par radiation peut se calculer assez bien à l'aide de cette application. On tire profit du traitement facile des images bitmap pour interroger l'utilisateur sur le type de configuration de système qu'il veut traiter. Un bouton radio (radio button) est également créé pour permettre le choix d'une configuration dans la fenêtre d'affichage principale. Celui-ci est un moyen efficace pour traiter des attributs composés (compound), plus précisément des attributs qui peuvent prendre plusieurs valeurs. Ceci allège parfois le traitement des attributs des classes avec les méthodes, les règles et les "daemons". Donc après avoir choisi une configuration de système, la fenêtre d'interrogation numérique demande à l'utilisateur les données nécessaires au calcul du coefficient équivalent pour le système à l'étude; les coefficients d'émissivité et les températures de surface. Un résultat est par la suite généré.

4.2.7 Le fichier nisa.knb

C'est à l'aide de ce fichier qu'une interface simple de communication entre LEVEL5 OBJECT et le code de simulation numérique nisa386 a été conçue. Par l'activation du bouton **édition nisa**, il est possible d'activer Microsoft Word. Une fois dedans il suffit d'ouvrir un fichier .nis quelconque, le convertir et ensuite le sauvegarder en format DOS. Dès que nous fermons Word, nous revenons à l'application LEVEL5 OBJECT (nisa.knb) qui nous a permis d'activer Word. De la même manière nous pouvons charger nisa386 en activant l'autre bouton poussoir étiqueté **activer nisa386**. Une fois que nisa386 est chargé nous avons l'option de générer un modèle de simulation, le modifier ou en modifier un autre, de lancer une simulation du modèle qu'on vient de créer ou un autre de même que l'option de visualiser des résultats de simulation.

Dès que nous quittons nisa386, nous revenons à la fenêtre d'affichage de l'application en LEVEL5 OBJECT (nisa.knb) qui nous a permis de transférer le contrôle au code de simulation numérique.

4.3 Recommandations

En premier lieu, il serait important de se procurer la version 3.5 de LEVEL5 OBJECT, cette dernière version comporte d'autres options qui ne sont pas disponibles sur l'ancienne version 2.5. Trois autres grandes acquisitions s'imposent pour rendre plus facile la tâche de développement du prototype de système expert en électrothermie; un système multimédia, un scanner d'images graphiques et de texte ainsi que le logiciel de compression d'images Ghostscript. Ce sont des outils qui permettent une meilleure gestion d'un bon nombre de ressources graphiques qui n'ont jamais été regroupées auparavant. D'un autre côté il est important d'établir une communication plus étroite avec des organismes comme le Comité Canadien des Électrotechnologies et la Société Française de Thermiciens dans le but d'obtenir le plus de références sur ce qui se fait en électrothermie industrielle, ceci va nous permettre éventuellement de bâtir une base de connaissances de plus en plus complète.

CONCLUSION

Le développement d'un prototype de système expert en électrothermie a permis d'explorer les techniques de résolution des problèmes à caractère scientifique par l'entremise du concept d'intelligence artificielle. De la même manière ce projet nous a permis de vérifier l'utilité de plusieurs applications logicielles et matérielles pour permettre des échanges d'information entre des programmes qui auparavant fois étaient complètement incompatibles. La portabilité des applications commerciales est donc essentielle au développement d'un système expert.

En prenant une coquille et en la peuplant avec des connaissances en électrothermie nous solutionnons seulement une partie du problème associé à la pratique de cette technique. Il reste encore à développer un système expert qui soit capable d'intégrer la méthode de calcul par éléments finis, les modèles stochastiques et d'autres outils mathématiques que la plupart de systèmes commerciaux ne réussissent pas à intégrer pour le moment. Il faudra donc se tourner vers des applications qui opèrent sur des plates-formes multi-tâches. Éventuellement il faudra aussi attendre la commercialisation des ordinateurs parallèles pour que plusieurs obstacles en matière d'algorithmes de calcul soient surmontés. Pour le moment la coquille LEVEL5 OBJECT peut être regardée comme un outil de formation en matière d'intelligence artificielle qui permettra à ses utilisateurs potentiels d'être en mesure de pouvoir développer et utiliser des systèmes encore plus complexes ultérieurement.

RÉFÉRENCES

- [1] James Martin, Steven Oxman, Building Expert Systems A Tutorial, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988. pp. 14-55.
- [2] Ken Pendersen, Expert Systems Programming Practical Technique for Rule-based Systems, John Wiley & Sons, New York, 1989, pp. 3-12.
- [3] Michael L. Brodie, John Mylopoulos, On knowledge Base Management Systems Integrating Artificial Intelligence and Database Technologies, R. R. Donnelly & Sons Harrisonburg, Virginia, 1986, pp. 83-86.
- [4] Edmon T. Miresco, Nicolas Chepruniy, Le Développement d'un système expert pour la génération de la logique de planification des projets de construction, Proceedings of the IASTED International Symposium, Zurich, Switzerland, June 26-28, 1989. pp. 10-12.
- [5] Ivan Bratko, Prolog Programming for Artificial Intelligence, Addison-Wesley Publishers Ltd Great Britain, 1990, pp. 332-343.
- [6] G. A. Ringland, D. A. Duce, Approaches to Knowledge Representation. An Introduction, Research Studies Press Ltd., Lechworth, Hertfordshire, England, 1988, pp.
- [7] Patrick Brezillon, Interprétation et Paquets de Règles dans un système Expert, Proceedings of the IASTED International Symposium, Zurich, Switzerland, June 26-28, 1989. pp. 38-40.
- [8] Sandra Marcus, Automating Knowledge Acquisition of Expert Systems, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, 1988, p. 17
- [9] K. Debebe, V. Rajagopalan, Expert Systems for Fault Diagnosis of VSI Fed AC Drives, 1991 IEEE Industry Applications Conference Twenty-sixth IAS Annual Meeting, Dearborn, Michigan, September 28- October 4, 1991, p. 369.
- [10] F. D. Galiana et al., A Study Of Knowledge Engineering Tools in Power Engineering Applications, Canadian Electrical Association Committee on Expert Systems, Proceedings of Session on Expert Systems, Montréal, 29 Mars, 1993.
- [11] A. V. Machias, S. D. Kaminaris, Electric Machines Troubleshooting, Repairing and Maintenance Expert System Methodology, Proceedings of the IASTED International Symposium, Zurich, Switzerland, June 26-28, 1989. pp. 302-305.
- [12] Michel Le Seach, Développer un système expert, Éditests, Paris, 1989, pp 161-163.
- [13] Marvin H. Klayton, Fundamental Electrical technology, 2nd edition, Addison-Wesley Publishing Company, Reding, Massachutesetts, 1977, pp. 39-49.

- [14] Maurice Orfeuil, Electrothermie Industrielle, Dunod, Paris, 1981, p. 435.
- [15] Donald G. Fink, Standard Handbook for Electrical Engineers, 12th edition, Mc Graw Hill Book Company, New York, 1987, pp. 2-10-2-24.
- [16] Anatole Sévigny, Notes de cours Electrotechnique des Machines I, UQTR, Trois Rivières Québec, 1993, p. 6.15.
- [17] Donald V. Richardson, Handbook of rotating machines, Reston Publishing Company Inc., Reston Virginia, 1980, p. 180.
- [18] C. L. Dawes, Electrical Engineering Vol I Direct currents, McGraw Hill, New York, 1952.
- [19] Colonel Wm. T. McLyman, Transformer and Inductor Design Hanbook, Marcel Dekker Inc., New York , 1978, p. 242.
- [20] Ned Mohan et al., Power Electronics: Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons, New York, 1989, pp. 12-15.
- [21] Dave S. Steinberg, Cooling Techniques for Electronic Equipment, 2nd edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 1991, p.103.
- [22] Gordon N. Ellison, Thermal Computation for Electronic Equipement, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1984, pp. 72-95.
- [23] Germund Dahlquist, Åke Björck, Numerical Methods, Prentice-Hall, Series in Automatic Computation, Englewood Cliffs, New Jersey, 1974, pp. 455-459.
- [24] Bélaïd Fèrid, Mémoire de Maîtrise, Université du Québec à Trois Rivières, Trois Rivières, Québec, Septembre 1990, pp. 135-140.
- [25] Abraham Kandel, Fuszy Expert Systemes, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 1992, pp. 8-12 et pp. 203-211.

ANNEXE A

Fichiers PRL des applications créées à l'aide de LEVEL5 OBJECT

Fichier pertes.prl de l'application pertes.knb

```

$VERSION25
$LOCATIONS ARE PIXELS

ATTRIBUTE calcul SIMPLE
  WHEN CHANGED
  BEGIN
    PURSUE pertes
  END
ATTRIBUTE courant NUMERIC
  TEXT "Quel est le courant dans le conducteur en question ?"
ATTRIBUTE resistance NUMERIC
  TEXT "Quelle est la résistance du conducteur ?"
ATTRIBUTE pertes NUMERIC
  SEARCH ORDER CONTEXT RULES DEFAULT
ATTRIBUTE effet_température SIMPLE
  TEXT "Voules vous tenir compte de l'effet de la température sur la rés\
istance ?"
ATTRIBUTE alpha0 NUMERIC
  TEXT "Quel est le coefficient alpha0 du conducteur ?"
ATTRIBUTE T1 NUMERIC
  TEXT "A quelle temperature sa resistance a été mesurée ?"
ATTRIBUTE T2 NUMERIC
  TEXT "A quelle température voulez vous opérer ?"
ATTRIBUTE resis_eq NUMERIC
  SEARCH ORDER CONTEXT RULES DEFAULT
ATTRIBUTE effet_pelliculaire SIMPLE
  TEXT "Voulez vous considérer l'effet pelliculaire sur la resistance ?"
ATTRIBUTE compute SIMPLE
ATTRIBUTE longueur NUMERIC
  TEXT "Quelle est la longueur en mètres du conducteur ?"
ATTRIBUTE permeabilité NUMERIC
ATTRIBUTE frequence NUMERIC
  TEXT "Quelle est la fréquence d'opération du conducteur ?"
ATTRIBUTE x NUMERIC
ATTRIBUTE K NUMERIC
  QUERY FROM Facteur K
ATTRIBUTE resis_pel NUMERIC
  SEARCH ORDER CONTEXT RULES DEFAULT

INSTANCE the application ISA application
  WITH unknowns fail := TRUE
  WITH threshold := 50
  WITH title display := display 1

```

```

WITH ignore breakpoints := FALSE
WITH reasoning on := FALSE
WITH numeric precision := 8
WITH simple query text := "Is it true that:
*
is
*"
WITH numeric query text := "What is(are):
*
of
*"
WITH string query text := "What is(are):
*
of
*"
WITH time query text := "What is(are):
*
of
*"
WITH interval query text := "What is(are):
*
of
*"
WITH compound query text := "What is(are):
*
of
*"
WITH multicomponent query text := "What is(are):
*
of
*"
WITH demon strategy IS fire first
WITH visible file menu := TRUE

INSTANCE numeric query ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := TRUE
  WITH items [1 ] := promptbox for numeric query
  WITH items [2 ] := numeric query textbox
  WITH items [3 ] := pushbutton 5
  WITH items [4 ] := pushbutton 6

INSTANCE simple query ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := TRUE
  WITH items [1 ] := true false box for simple query

```

```

WITH items [2 ] := simple query textbox
WITH items [3 ] := pushbutton 10
WITH items [4 ] := pushbutton 11

```

```

INSTANCE display 1 ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := textbox 9
  WITH items [2 ] := pushbutton 1
  WITH items [3 ] := pushbutton 2
  WITH items [4 ] := UNDETERMINED

```

```

INSTANCE resultats ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := textbox 10
  WITH items [2 ] := valuebox 1
  WITH items [3 ] := textbox 11
  WITH items [4 ] := pushbutton 3
  WITH items [5 ] := pushbutton 4

```

```

INSTANCE effet_thermique ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := valuebox 2
  WITH items [2 ] := valuebox 3
  WITH items [3 ] := textbox 12
  WITH items [4 ] := textbox 13
  WITH items [5 ] := textbox 14
  WITH items [6 ] := textbox 15
  WITH items [7 ] := valuebox 4
  WITH items [8 ] := textbox 16
  WITH items [9 ] := textbox 17
  WITH items [10 ] := pushbutton 8
  WITH items [11 ] := pushbutton 9

```

```

INSTANCE Facteur K ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := textbox 18
  WITH items [2 ] := promptbox 5
  WITH items [3 ] := textbox 19
  WITH items [4 ] := valuebox 5
  WITH items [5 ] := textbox 20
  WITH items [6 ] := pushbutton 12

```

```

INSTANCE effet_peau ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := textbox 21
  WITH items [2 ] := valuebox 6
  WITH items [3 ] := textbox 22
  WITH items [4 ] := textbox 23
  WITH items [5 ] := valuebox 7
  WITH items [6 ] := textbox 24
  WITH items [7 ] := valuebox 8
  WITH items [8 ] := textbox 25
  WITH items [9 ] := textbox 26
  WITH items [10 ] := pushbutton 13
  WITH items [11 ] := pushbutton 14

```

```

INSTANCE promptbox 5 ISA promptbox
  WITH location := 349,69,442,97
  WITH justify IS left
  WITH frame := TRUE
  WITH show current := TRUE
  WITH attachment := K

```

```

INSTANCE pushbutton 1 ISA pushbutton
  WITH location := 91,243,163,273
  WITH label := "sortir"
  WITH attribute attachment := exit OF application

```

```

INSTANCE pushbutton 2 ISA pushbutton
  WITH location := 269,254,577,274
  WITH label := "calculer les pertes resistives du circuit"
  WITH attribute attachment := calcul

```

```

INSTANCE pushbutton 3 ISA pushbutton
  WITH location := 450,161,551,192
  WITH label := "sortir"
  WITH attribute attachment := exit OF application

```

```

INSTANCE pushbutton 4 ISA pushbutton
  WITH location := 28,148,108,179
  WITH label := "retour"
  WITH attribute attachment := exit OF application

```

```

INSTANCE pushbutton 5 ISA pushbutton
  WITH location := 29,181,149,213
  WITH label := "sortir"
  WITH attribute attachment := exit OF application

```

INSTANCE pushbutton 6 ISA pushbutton
 WITH location := 371,181,492,212
 WITH label := "continuer"
 WITH attribute attachment := continue display OF main window

INSTANCE pushbutton 8 ISA pushbutton
 WITH location := 30,251,112,278
 WITH label := "retour"
 WITH attribute attachment := restart OF application

INSTANCE pushbutton 9 ISA pushbutton
 WITH location := 440,251,532,278
 WITH label := "sortir"
 WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 10 ISA pushbutton
 WITH location := 40,172,161,198
 WITH label := "sortir"
 WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 11 ISA pushbutton
 WITH location := 360,170,483,198
 WITH label := "continuer"
 WITH attribute attachment := continue display OF main window

INSTANCE pushbutton 12 ISA pushbutton
 WITH location := 430,169,531,193
 WITH label := "continuer"
 WITH attribute attachment := continue display OF main window

INSTANCE pushbutton 13 ISA pushbutton
 WITH location := 427,269,529,296
 WITH label := "sortir"
 WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 14 ISA pushbutton
 WITH location := 46,276,160,303
 WITH label := "retour"
 WITH attribute attachment := restart OF application

INSTANCE textbox 9 ISA textbox
 WITH location := 12,20,474,101
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 0,255,255
 WITH justify IS left

WITH font := "System"
 WITH text := "LABORATOIRE D'ÉLECTROTHERMIE INDUSTRIELLE"

CALCUL DES PERTES RESISTIVES DANS LES CONDUCTEURS"

INSTANCE textbox 10 ISA textbox
 WITH location := 13,19,350,45
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 0,255,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH frame := TRUE
 WITH text := "Les pertes resistives totales dans le circuit sont:"

INSTANCE textbox 11 ISA textbox
 WITH location := 451,20,501,44
 WITH pen color := 0,255,255
 WITH fill color := 0,0,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH frame := TRUE
 WITH text := "WATTS"

INSTANCE textbox 12 ISA textbox
 WITH location := 2,83,271,109
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 0,255,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH frame := TRUE
 WITH text := "La nouvelle valeur de resistance est de:"

INSTANCE textbox 13 ISA textbox
 WITH location := 270,109,317,135
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 0,255,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH frame := TRUE
 WITH text := "Ohms"

INSTANCE textbox 14 ISA textbox
 WITH location := 2,161,446,187
 WITH pen color := 255,255,0
 WITH fill color := 0,0,255

WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := "Les pertes résistives dans le conducteur à cette température sont:"

INSTANCE textbox 15 ISA textbox
 WITH location := 0,2,254,27
 WITH pen color := 255,255,0
 WITH fill color := 0,0,0
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH frame := TRUE
 WITH text := "Pour une température d'opération de:"

INSTANCE textbox 16 ISA textbox
 WITH location := 253,26,368,51
 WITH pen color := 255,255,0
 WITH fill color := 0,0,0
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := "Degrés Celcius"

INSTANCE textbox 17 ISA textbox
 WITH location := 446,187,501,216
 WITH pen color := 255,255,0
 WITH fill color := 0,0,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := "WATTS"

INSTANCE textbox 18 ISA textbox
 WITH location := 30,69,348,97
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 255,255,0
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH frame := TRUE
 WITH text := "Quelle est la valeur de K pour un tel facteur x ?"

INSTANCE textbox 19 ISA textbox
 WITH location := 25,41,227,63
 WITH pen color := 255,255,0
 WITH fill color := 0,0,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := "La valeur du facteur x est de:"

```

INSTANCE textbox 20 ISA textbox
  WITH location := 30,130,373,235
  WITH pen color := 255,255,255
  WITH fill color := 0,0,255
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH text := "x      K      x      K      x      K
0.0      1.00000      6.6      2.9      17.0      6.26817
"

```

```

INSTANCE textbox 21 ISA textbox
  WITH location := 9,32,171,58
  WITH pen color := 255,255,0
  WITH fill color := 0,0,0
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH text := "Pour une fréquence de:"

```

```

INSTANCE textbox 22 ISA textbox
  WITH location := 261,32,331,56
  WITH pen color := 255,255,0
  WITH fill color := 0,0,0
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH text := "Hertz"

```

```

INSTANCE textbox 23 ISA textbox
  WITH location := 10,73,270,106
  WITH pen color := 255,255,0
  WITH fill color := 0,0,255
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH text := "A cause de l'effet de peau la nouvelle résistance du con\
ducteur est de:"

```

```

INSTANCE textbox 24 ISA textbox
  WITH location := 10,132,302,155
  WITH pen color := 0,0,255
  WITH fill color := 0,255,255
  WITH justify IS left

```

```

WITH font := "System"
WITH frame := TRUE
WITH text := "Les pertes résistives dans un tel cas sont de:"

```

```

INSTANCE textbox 25 ISA textbox
  WITH location := 426,131,478,152
  WITH pen color := 0,0,255
  WITH fill color := 0,255,255
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH text := "WATTS"

```

```

INSTANCE textbox 26 ISA textbox
  WITH location := 363,78,412,103
  WITH pen color := 255,255,0
  WITH fill color := 0,0,255
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH text := "Ohms"

```

```

INSTANCE valuebox 1 ISA valuebox
  WITH location := 350,20,451,45
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := pertes

```

```

INSTANCE valuebox 2 ISA valuebox
  WITH location := 332,187,447,216
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := pertes

```

```

INSTANCE valuebox 3 ISA valuebox
  WITH location := 169,109,271,135
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := resis_eq

```

```

INSTANCE valuebox 4 ISA valuebox
  WITH location := 153,26,255,51
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := T2

```

```

INSTANCE valuebox 5 ISA valuebox
  WITH location := 227,40,300,63
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := x

```

```

INSTANCE valuebox 6 ISA valuebox
  WITH location := 171,31,262,57
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := frequence

```

```

INSTANCE valuebox 7 ISA valuebox
  WITH location := 271,78,363,104
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := resis_pel

```

```

INSTANCE valuebox 8 ISA valuebox
  WITH location := 303,131,425,154
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := pertes

```

```

INSTANCE main window ISA window
  WITH location := -1,-1,-1,-1
  WITH full screen := TRUE
  WITH style IS moveable, sizeable, closeable
  WITH title := "CALCUL DES PERTES RESISTIVES DANS LES CONDUCTEURS"
  WITH visible := TRUE

```

```

WITH continue display := TRUE
WITH visible OK button := TRUE

```

```

RULE Calcul de l'effet pelliculaire sur la resistance du fil
IF calcul
AND resistance > 0
AND effet_pelliculaire
AND longueur > 0
AND permeabilite > 0
AND frequence > 0
THEN x := 0.0683598 * SQRT( (frequence * permeabilite) / (resistance / (\
longueur / 1609)))
AND resis_pel := resistance * K
AND pertes := resis_pel * courant * courant
AND output OF main window := effet_peau

```

```

RULE calcul de l'effet temperature sur la resistance
IF calcul
AND resistance > 0
AND effet_temperature
AND T1 > 0
AND T2 > 0
AND alpha0 > 0
AND courant > 0
THEN resis_eq := resistance * ((1 + alpha0 * T2) / (1 + alpha0 * T1))
AND pertes := resis_eq * courant * courant
AND output OF main window := effet_thermique

```

```

RULE Calcul des pertes resistives dans un circuit
IF calcul
AND courant > 0
AND resistance > 0
AND NOT effet_temperature
AND NOT effet_pelliculaire

THEN pertes := courant * courant * resistance
AND output OF main window := resultats

```

```

END

```

Fichier convec.prl de l'application convec.knb

```

$VERSION25
$LOCATIONS ARE PIXELS

```

```

CLASS action data

```

```

WITH trouve_profil1 SIMPLE
  INIT TRUE
  WHEN CHANGED
  BEGIN
    output OF main window := main input display
    horiz_haut OF surface := TRUE
    filename OF scenario picturebox := filename OF picturebox 1
    text OF volet textbox := " Vous avez choisi le système HORIZONTAL\
L VERS LE HAUT"
  END
WITH trouve_profil2 SIMPLE
  INIT TRUE
  WHEN CHANGED
  BEGIN
    output OF main window := main input display
    horiz_bas OF surface := TRUE
    filename OF scenario picturebox := filename OF picturebox 2
    text OF volet textbox := " Vous avez choisi le système HORIZONTAL\
L VERS LE BAS"
  END
WITH trouve_profil3 SIMPLE
  INIT TRUE
  WHEN CHANGED
  BEGIN
    output OF main window := main input display
    horiz_cyl OF surface := TRUE
    filename OF scenario picturebox := filename OF picturebox 3
    text OF volet textbox := "Vous avez choisi le système HORIZONTAL\
CYLINDRIQUE"
  END
WITH trouve_profil4 SIMPLE
  INIT TRUE
  WHEN CHANGED
  BEGIN
    output OF main window := main input display
    vert_norm OF surface := TRUE
    filename OF scenario picturebox := filename OF picturebox 4
    text OF volet textbox := " Vous avez choisi le système VERTICAL \
NORMAL"
  END

CLASS compute
  WITH calcul_h SIMPLE
  WHEN CHANGED
  BEGIN
    PURSUE h OF surface

```

```

    output OF main window := calcul_resultat
  END
  SEARCH ORDER CONTEXT WHEN NEEDED RULES QUERY DEFAULT
WITH calcul_rayl SIMPLE
  WHEN CHANGED
  BEGIN
    PURSUE rayleigh OF surface
    PURSUE laminaire OF surface
    PURSUE turbulent OF surface
    output OF main window := calcul_regime
  END

CLASS surface
  WITH longueur NUMERIC
  QUERY FROM main input display
  SEARCH ORDER CONTEXT WHEN NEEDED RULES QUERY DEFAULT
WITH temp_surf NUMERIC
  QUERY FROM main input display
  SEARCH ORDER CONTEXT
WITH temp_amb NUMERIC
  QUERY FROM main input display
  SEARCH ORDER CONTEXT
WITH h NUMERIC
  SEARCH ORDER DEFAULT CONTEXT RULES
WITH rayleigh NUMERIC
  WHEN NEEDED
  BEGIN
    rayleigh OF surface := ( EXP(3 * LN( longueur OF surface))) * (t\
emp_surf OF surface - temp_amb OF surface) * EXP( LN( 6.4) + 7 * LN( 10)\
)
  END
  SEARCH ORDER CONTEXT WHEN NEEDED RULES QUERY DEFAULT
WITH horiz_haut SIMPLE
  SEARCH ORDER DEFAULT
WITH horiz_bas SIMPLE
  SEARCH ORDER DEFAULT
WITH horiz_cyl SIMPLE
  SEARCH ORDER DEFAULT
WITH vert_norm SIMPLE
  SEARCH ORDER DEFAULT
WITH vert_cyl SIMPLE
  SEARCH ORDER DEFAULT
WITH laminaire SIMPLE
  SEARCH ORDER RULES DEFAULT
WITH turbulent SIMPLE
  SEARCH ORDER RULES DEFAULT

```



```

INSTANCE the application ISA application
  WITH goal select := TRUE
  WITH unknowns fail := TRUE
  WITH threshold := 50
  WITH title display := display 1
  WITH ignore breakpoints := FALSE
  WITH reasoning on := FALSE
  WITH numeric precision := 8
  WITH simple query text := "Is it true that:
  *
is
  *"
  WITH numeric query text := "What is(are):
  *
of
  *"
  WITH string query text := "What is(are):
  *
of
  *"
  WITH time query text := "What is(are):
  *
of
  *"
  WITH interval query text := "What is(are):
  *
of
  *"
  WITH compound query text := "What is(are):
  *
of
  *"
  WITH multicomponent query text := "What is(are):
  *
of
  *"
  WITH demon strategy IS fire first
  WITH visible file menu := TRUE

INSTANCE display 1 ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := UNDETERMINED
  WITH items [2 ] := UNDETERMINED

```

```

WITH items [3 ] := pushbutton 1
WITH items [4 ] := pushbutton 2
WITH items [5 ] := textbox 11
WITH items [6 ] := textbox 20
WITH items [7 ] := textbox 21

```

```

INSTANCE convection1 display ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := textbox 10
  WITH items [2 ] := UNDETERMINED
  WITH items [3 ] := picturebox 1
  WITH items [4 ] := picturebox 2
  WITH items [5 ] := UNDETERMINED
  WITH items [6 ] := UNDETERMINED
  WITH items [7 ] := UNDETERMINED
  WITH items [8 ] := UNDETERMINED
  WITH items [9 ] := UNDETERMINED
  WITH items [10 ] := textbox 15
  WITH items [11 ] := hor_haut pushbutton
  WITH items [12 ] := hor_bas pushbutton
  WITH items [13 ] := pushbutton 5
  WITH items [14 ] := pushbutton 12

```

```

INSTANCE convection2 display ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := pushbutton 6
  WITH items [2 ] := pushbutton 7
  WITH items [3 ] := pushbutton 8
  WITH items [4 ] := pushbutton 9
  WITH items [5 ] := picturebox 3
  WITH items [6 ] := picturebox 4

```

```

INSTANCE main input display ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := volet textbox
  WITH items [2 ] := scenario picturebox
  WITH items [3 ] := textbox 13
  WITH items [4 ] := textbox 14
  WITH items [5 ] := promptbox 5
  WITH items [6 ] := promptbox 6
  WITH items [7 ] := textbox 16
  WITH items [8 ] := promptbox 7
  WITH items [9 ] := UNDETERMINED

```

```

WITH items [10] := UNDETERMINED
WITH items [11] := UNDETERMINED
WITH items [12] := UNDETERMINED
WITH items [13] := UNDETERMINED
WITH items [14] := pushbutton 10
WITH items [15] := pushbutton 11
WITH items [16] := UNDETERMINED
WITH items [17] := UNDETERMINED
WITH items [18] := regime pushbutton

```

```

INSTANCE calcul_regime ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1] := resultat1 textbox
  WITH items [2] := pushbutton 14
  WITH items [3] := pushbutton 17
  WITH items [4] := pushbutton 18
  WITH items [5] := valuebox 2
  WITH items [6] := textbox 24

```

```

INSTANCE calcul_resultat ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1] := textbox 22
  WITH items [2] := valuebox 1
  WITH items [3] := textbox 23
  WITH items [4] := sortir
  WITH items [5] := pushbutton 16

```

```

INSTANCE picturebox 1 ISA picturebox
  WITH location := 68,174,219,330
  WITH clipped := TRUE
  WITH frame := TRUE
  WITH filename := "C:\L5O25\HORHAUT.BMP"

```

```

INSTANCE picturebox 2 ISA picturebox
  WITH location := 324,166,512,316
  WITH clipped := TRUE
  WITH frame := TRUE
  WITH filename := "C:\L5O25\HORBAS.BMP"

```

```

INSTANCE picturebox 3 ISA picturebox
  WITH location := 39,71,212,260
  WITH clipped := TRUE
  WITH frame := TRUE
  WITH filename := "C:\L5O25\CYLHOR.BMP"

```

INSTANCE picturebox 4 ISA picturebox
 WITH location := 359,72,508,261
 WITH clipped := TRUE
 WITH frame := TRUE
 WITH filename := "C:\L5O25\VERTNOR.BMP"

INSTANCE scenario picturebox ISA picturebox
 WITH location := 369,4,575,208
 WITH clipped := TRUE
 WITH frame := TRUE

INSTANCE promptbox 5 ISA promptbox
 WITH location := 272,43,343,72
 WITH justify IS left
 WITH frame := TRUE
 WITH show current := TRUE
 WITH attachment := longueur OF surface

INSTANCE promptbox 6 ISA promptbox
 WITH location := 286,85,357,114
 WITH justify IS left
 WITH frame := TRUE
 WITH show current := TRUE
 WITH attachment := temp_surf OF surface

INSTANCE promptbox 7 ISA promptbox
 WITH location := 288,143,359,172
 WITH justify IS left
 WITH frame := TRUE
 WITH show current := TRUE
 WITH attachment := temp_amb OF surface

INSTANCE pushbutton 1 ISA pushbutton
 WITH location := 434,383,555,410
 WITH label := "continuer"
 WITH display attachment := convection1 display

INSTANCE pushbutton 2 ISA pushbutton
 WITH location := 20,380,141,407
 WITH label := "sortir"
 WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE hor_haut pushbutton ISA pushbutton
 WITH location := 31,116,251,154
 WITH label := "Surface horizontale vers le haut."

WITH attribute attachment := trouve_profil1 OF action data

INSTANCE hor_bas pushbutton ISA pushbutton
 WITH location := 319,116,539,154
 WITH label := "Surface horizontale vers le bas."
 WITH attribute attachment := trouve_profil2 OF action data

INSTANCE pushbutton 5 ISA pushbutton
 WITH location := 421,380,541,403
 WITH label := "continuer"
 WITH display attachment := convection2 display

INSTANCE pushbutton 6 ISA pushbutton
 WITH location := 298,16,559,58
 WITH label := "surface verticale normale/cylindrique"
 WITH attribute attachment := trouve_profil4 OF action data

INSTANCE pushbutton 7 ISA pushbutton
 WITH location := 26,24,243,57
 WITH label := "surface horizontale cylindrique"
 WITH attribute attachment := trouve_profil3 OF action data
 WITH display attachment := main input display

INSTANCE pushbutton 8 ISA pushbutton
 WITH location := 51,313,208,348
 WITH label := "restart"
 WITH attribute attachment := restart OF application

INSTANCE pushbutton 9 ISA pushbutton
 WITH location := 379,312,542,349
 WITH label := "sortir"
 WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 10 ISA pushbutton
 WITH location := 22,351,134,382
 WITH label := "retour"
 WITH attribute attachment := restart OF application

INSTANCE pushbutton 11 ISA pushbutton
 WITH location := 425,359,537,390
 WITH label := "sortir"
 WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 12 ISA pushbutton
 WITH location := 38,377,158,400
 WITH label := "sortir"

WITH attribute attachment := exit OF application
 WITH display attachment := convection2 display

INSTANCE regime pushbutton ISA pushbutton
 WITH location := -5,201,164,234
 WITH label := "déterminer le régime"
 WITH attribute attachment := calcul_rayl OF compute

INSTANCE pushbutton 14 ISA pushbutton
 WITH location := 18,80,226,113
 WITH label := "calculer h"
 WITH attribute attachment := calcul_h OF compute

INSTANCE sortir ISA pushbutton
 WITH location := 380,111,510,135
 WITH label := "sortir"
 WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 16 ISA pushbutton
 WITH location := 26,110,156,134
 WITH label := "retour"
 WITH attribute attachment := restart OF application

INSTANCE pushbutton 17 ISA pushbutton
 WITH location := 10,169,118,201
 WITH label := "retour"
 WITH attribute attachment := restart OF application

INSTANCE pushbutton 18 ISA pushbutton
 WITH location := 421,178,531,209
 WITH label := "sortir"
 WITH attribute attachment := restart OF application

INSTANCE textbox 10 ISA textbox
 WITH location := 3,9,615,60
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 255,255,0
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := "CALCUL DU COEFFICIENT DE TRANSFERT DE CHALEUR PAR
 CONVECTION NATURELLE SELON LA METHODE DE MAC ADAMS, EN TENANT COMPTE DU
 RÉGIME D'ÉCOULEMENT DU FLUIDE ET DU PROFIL DU SYSTÈME."

INSTANCE textbox 11 ISA textbox

```

WITH location := 0,1,599,90
WITH pen color := 0,0,255
WITH fill color := 0,255,255
WITH justify IS left
WITH font := "System"
WITH text := "Le problème majeur dans l'analyse du phénomène de la con\
vection est celui de pouvoir prédire avec exactitude les valeurs du coe\
fficient h de transfert de chaleur par convection dans les applications \
de design. La valeur de h pour différents régimes d'écoulement et pour d\
ifférents fluides se trouve généralement à l'intérieur des plages spécif\
iées dans le tableau ci-bas.

```

"

```

INSTANCE textbox 15 ISA textbox
  WITH location := 29,75,504,104
  WITH pen color := 0,0,255
  WITH fill color := 0,255,255
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH text := "QUEL SYSTÈME SE RAPPROCHE LE PLUS DE VOTRE APPLICATION ?"

```

```

INSTANCE volet textbox ISA textbox
  WITH location := 2,3,359,38
  WITH pen color := 0,0,0
  WITH fill color := 255,0,0
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH text := ""

```

```

INSTANCE textbox 13 ISA textbox
  WITH location := -1,39,271,73
  WITH pen color := 255,255,255
  WITH fill color := 0,0,255
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH text := "Quelle est la longueur caractéristique l ou d en mètres \
de ce profil ?

```

"

```

INSTANCE textbox 14 ISA textbox
  WITH location := 1,74,285,116
  WITH pen color := 0,255,255
  WITH fill color := 0,0,255
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"

```

WITH text := "Quelle est la température moyenne en degrés Celcius sur la surface considérée ?"

INSTANCE textbox 16 ISA textbox

WITH location := 1,119,287,174

WITH pen color := 255,255,0

WITH fill color := 0,0,0

WITH justify IS left

WITH font := "System"

WITH text := "Quelle est la température ambiante moyenne en degrés Celcius autour de la surface considérée ?"

INSTANCE regime textbox ISA textbox

WITH location := 372,279,524,305

WITH justify IS left

WITH font := "System"

WITH frame := TRUE

WITH text := ""

INSTANCE textbox 20 ISA textbox

WITH location := 1,91,457,239

WITH pen color := 0,0,0

WITH fill color := 255,255,0

WITH justify IS left

WITH font := "System"

WITH text := "-----\n

-----\n

Système de convection

Plage de h en KW/m**2.C

-----\n

-----\n

Convection naturelle	0.004-0.05
Convection forcée (air)	0.01-0.55
Convection forcée (fluides)	0.1-5.5
Transfert de chaleur par ebullition (eau)	1.0-110.0
Condensation (vapeur, couche limite)	0.55-25.0
Convection forcée (metaux liquides)	3.0-110.0

"

INSTANCE textbox 21 ISA textbox

WITH location := 0,242,591,371

WITH pen color := 0,0,255

WITH fill color := 0,255,255

WITH justify IS left

WITH font := "System"

WITH frame := TRUE
 WITH scroll := FALSE
 WITH text := "Il est possible d'estimer la valeur de h par les relations de Mc Adams sans avoir à tenir compte des propriétés des fluides. Un tel calcul comporte toute fois une erreur d'estimation de h d'à peu près 10%, mais en pratique c'est très acceptable. Donc pour pouvoir obtenir de résultats réalistes avec la méthode proposée il est nécessaire de faire une analogie entre les systèmes proposés graphiquement et le système réel qu'on veut considérer. Ceci demande de faire abstraction de plusieurs facteurs dont il n'est pas toujours facile de tenir compte, tels que l'irrégularité des surfaces, les obstacles à l'écoulement et autres."

INSTANCE resultat1 textbox ISA textbox

WITH location := 18,33,512,60
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 0,255,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := ""

INSTANCE textbox 22 ISA textbox

WITH location := 1,0,349,50
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 0,255,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := "Le coefficient de convection naturelle pour une telle application est approximativement d'une valeur de:"

INSTANCE textbox 23 ISA textbox

WITH location := 425,59,503,82
 WITH pen color := 255,255,0
 WITH fill color := 0,0,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := " $\text{kW/m}^2 \cdot \text{C}$ "

INSTANCE textbox 24 ISA textbox

WITH location := 19,10,365,33
 WITH pen color := 255,255,0
 WITH fill color := 0,0,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := "Le nombre de Rayleigh associé à ce système est:"

```

INSTANCE valuebox 1 ISA valuebox
  WITH location := 270,50,425,82
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := h OF surface

```

```

INSTANCE valuebox 2 ISA valuebox
  WITH location := 368,9,528,31
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := rayleigh OF surface

```

```

INSTANCE main window ISA window
  WITH location := -1,-1,-1,-1
  WITH full screen := TRUE
  WITH style IS moveable, sizeable, closeable
  WITH title := "Laboratoire d'électrothermie industrielle Prototype de \
système expert."
  WITH visible := TRUE
  WITH visible OK button := TRUE

```

```

RULE Calcul de h laminaire pour profil horizontal cylindrique
IF laminaire OF surface = TRUE
AND horiz_cyl OF surface = TRUE
THEN h OF surface := (0.00131 * EXP( 0.25 * LN( temp_surf OF surface - t\
emp_amb OF surface) / longueur OF surface))

```

```

RULE Calcul de h laminaire pour profil horizontal vers le bas
IF laminaire OF surface = TRUE
AND horiz_bas OF surface = TRUE
THEN h OF surface := (0.00058 * EXP( 0.25 * LN( temp_surf OF surface - t\
emp_amb OF surface) / longueur OF surface))

```

```

RULE Calcul de h laminaire pour profil horizontal vers le haut
IF turbulent OF surface = TRUE
AND horiz_haut OF surface = TRUE
THEN h OF surface := (0.00131 * EXP( 0.25 * LN( temp_surf OF surface - t\
emp_amb OF surface) / longueur OF surface))

```

```

RULE Calcul de h laminaire profil vertical normal ou cylindrique
IF turbulent OF surface = TRUE
AND vert_norm OF surface = TRUE

```

```
THEN h OF surface := (0.00141 * EXP( 0.25 * LN( temp_surf OF surface - t\
emp_amb OF surface) / longueur OF surface))
```

```
RULE Calcul de h turbulent pour profil horizontal cylindrique
IF turbulent OF surface := TRUE
AND horiz_cyl OF surface := TRUE
THEN h OF surface := (0.00124 * EXP( 0.33 * LN( temp_surf OF surface - t\
emp_amb OF surface)))
```

```
RULE Calcul de h turbulent pour profil horizontal vers le bas
IF turbulent OF surface = TRUE
AND horiz_bas OF surface = TRUE
THEN h OF surface := (0.00058 * EXP( 0.25 * LN( temp_surf OF surface - t\
emp_amb OF surface) / longueur OF surface))
```

```
RULE Calcul de h turbulent pour profil horizontal vers le haut
IF turbulent OF surface = TRUE
AND horiz_haut OF surface = TRUE
THEN h OF surface := (0.00152 * EXP( 0.25 * LN( temp_surf OF surface - t\
emp_amb OF surface) / longueur OF surface))
```

```
RULE Calcul de h turbulent profil vertical normal ou cylindrique
IF turbulent OF surface = TRUE
AND vert_norm OF surface = TRUE
THEN h OF surface := (0.00131 * EXP( 0.33 * LN( temp_surf OF surface - t\
emp_amb OF surface)))
```

```
RULE Détermination du régime d'écoulement laminaire
IF rayleigh OF surface > 10000
AND rayleigh OF surface < 10000000000
THEN laminaire OF surface := TRUE
AND text OF resultat1 textbox := "Le régime d'écoulement pour ce système \
est du type laminaire"
```

```
RULE Détermination du régime d'écoulement turbulent
IF rayleigh OF surface > 10000000000
AND rayleigh OF surface < 10000000000000
THEN turbulent OF surface := TRUE
AND text OF resultat1 textbox := "Le régime d'écoulement pour ce système\
est du type turbulent"
```

```
END
```

Fichier nisa.prl de l'application nisa.knb

\$VERSION25

\$LOCATIONS ARE PIXELS

CLASS communication

WITH charger nisa SIMPLE

WHEN CHANGED

BEGIN

ESTABLISH "IPU, EXTERN, nisa386.exe"

END

WITH édition de fichier SIMPLE

WHEN CHANGED

BEGIN

ESTABLISH "IPU, EXTERN, winword.exe"

END

INSTANCE the application ISA application

WITH unknowns fail := TRUE

WITH threshold := 50

WITH title display := display 10

WITH ignore breakpoints := FALSE

WITH reasoning on := FALSE

WITH numeric precision := 8

WITH simple query text := "Is it true that:

*

is

*"

WITH numeric query text := "What is(are):

*

of

*"

WITH string query text := "What is(are):

*

of

*"

WITH time query text := "What is(are):

*

of

*"

WITH interval query text := "What is(are):

*

of

*"

WITH compound query text := "What is(are):

*

of

*"

```

WITH multicomponent query text := "What is(are):
*
of
*"
WITH demon strategy IS fire first
WITH visible file menu := TRUE

INSTANCE display 1 ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := pushbutton 1
  WITH items [2 ] := pushbutton 2
  WITH items [3 ] := pushbutton 3
  WITH items [4 ] := pushbutton 4

INSTANCE display 10 ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := pushbutton 5
  WITH items [2 ] := pushbutton 6
  WITH items [3 ] := textbox 9

INSTANCE pushbutton 1 ISA pushbutton
  WITH location := 38,50,161,73
  WITH label := "lancer nisa386"
  WITH attribute attachment := charger nisa OF communication

INSTANCE pushbutton 2 ISA pushbutton
  WITH location := 309,46,432,69
  WITH label := "édition nisa"
  WITH attribute attachment := édition de fichier OF communication

INSTANCE pushbutton 3 ISA pushbutton
  WITH location := 38,271,172,300
  WITH label := "retour"
  WITH attribute attachment := restart OF application

INSTANCE pushbutton 4 ISA pushbutton
  WITH location := 340,271,452,300
  WITH label := "sortir"
  WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 5 ISA pushbutton
  WITH location := 40,301,190,332
  WITH label := "sortir"
  WITH attribute attachment := exit OF application

```

```

INSTANCE pushbutton 6 ISA pushbutton
  WITH location := 340,301,491,325
  WITH label := "continuer"
  WITH display attachment := display 1

```

```

INSTANCE textbox 9 ISA textbox
  WITH location := 2,72,548,134
  WITH pen color := 0,0,255
  WITH fill color := 0,255,255
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
    WITH text := "LABORATOIRE D'ÉLECTROTHERMIE INTERFACE DE
COMMUNICATION \
ENTRE LEVLE5 OBJECT ET LE CODE DE SIMULATION NUMÉRIQUE PAR ÉLÉMENTS
FIN\
S nisa386."

```

```

INSTANCE main window ISA window
  WITH location := -1,-1,-1,-1
  WITH full screen := TRUE
  WITH style IS moveable, sizeable, closeable
  WITH title := "INTERFACE DE COMMUNICATION ENTRE LEVEL5 ET UNE AUTRE A\
PPLICATION"
  WITH visible := TRUE
  WITH visible OK button := TRUE

```

```

END

```

Fichier ic.prl de l'application ic.knb

```

$VERSION25

```

```

$LOCATIONS ARE PIXELS

```

```

ATTRIBUTE compute SIMPLE
  WHEN CHANGED
    BEGIN
      PURSUE dissip
    END

```

```

ATTRIBUTE Vcc NUMERIC

```

```

  TEXT "Quelle est en volts la tension (Vcctyp) du circuit ?"

```

```

ATTRIBUTE Icc NUMERIC

```

```

  TEXT "Quel est en ampères le courant (Icctyp) du circuit ?"

```

```

ATTRIBUTE Vol NUMERIC

```

```

  TEXT "Quelle est en volts la tension (Voltyp) du circuit ?"

```

```

ATTRIBUTE Iol NUMERIC
  TEXT "Quel est en ampère le courant (Ioltyp) du circuit ?"
ATTRIBUTE dissip NUMERIC
  SEARCH ORDER CONTEXT RULES DEFAULT
ATTRIBUTE pin_out NUMERIC
  TEXT "Quel est le nombre de broches de sortie du circuit ?"

```

```

INSTANCE the application ISA application
  WITH unknowns fail := TRUE
  WITH threshold := 50
  WITH title display := display 1
  WITH ignore breakpoints := FALSE
  WITH reasoning on := FALSE
  WITH numeric precision := 8
  WITH simple query text := "Is it true that:
  *
is
  *"
  WITH numeric query text := "What is(are):
  *
of
  *"
  WITH string query text := "What is(are):
  *
of
  *"
  WITH time query text := "What is(are):
  *
of
  *"
  WITH interval query text := "What is(are):
  *
of
  *"
  WITH compound query text := "What is(are):
  *
of
  *"
  WITH multicomponent query text := "What is(are):
  *
of
  *"
  WITH demon strategy IS fire first
  WITH visible file menu := TRUE

```

```

INSTANCE numeric query ISA display

```

```

WITH wait := TRUE
WITH delay changes := TRUE
WITH items [1 ] := promptbox for numeric query
WITH items [2 ] := numeric query textbox
WITH items [3 ] := pushbutton 5
WITH items [4 ] := pushbutton 6

INSTANCE display 1 ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := pushbutton 1
  WITH items [2 ] := pushbutton 2
  WITH items [3 ] := textbox 9
  WITH items [4 ] := textbox 10

INSTANCE resultats ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := textbox 11
  WITH items [2 ] := valuebox 1
  WITH items [3 ] := textbox 12
  WITH items [4 ] := pushbutton 3
  WITH items [5 ] := pushbutton 4

INSTANCE pushbutton 1 ISA pushbutton
  WITH location := 431,179,562,209
  WITH label := "continuer"
  WITH attribute attachment := compute

INSTANCE pushbutton 2 ISA pushbutton
  WITH location := 45,182,128,205
  WITH label := "sortir"
  WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 3 ISA pushbutton
  WITH location := 461,120,562,151
  WITH label := "sortir"
  WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 4 ISA pushbutton
  WITH location := 39,121,158,152
  WITH label := "retour"
  WITH attribute attachment := restart OF application

INSTANCE pushbutton 5 ISA pushbutton
  WITH location := 31,160,172,193

```


WITH label := "sortir"
 WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 6 ISA pushbutton
 WITH location := 331,160,462,189
 WITH label := "continuer"
 WITH attribute attachment := continue display OF main window

INSTANCE textbox 9 ISA textbox
 WITH location := 2,7,364,59
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 0,255,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH frame := TRUE
 WITH scroll := FALSE
 WITH text := "LABORATOIRE D'ÉLECTROTHERMIE INDUSTRIELLE
 CALCUL DES PERTES DANS LES CIRCUITS INTÉGRÉS"

INSTANCE textbox 10 ISA textbox
 WITH location := 219,107,587,158
 WITH pen color := 255,255,0
 WITH fill color := 0,0,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH frame := TRUE
 WITH text := "Avant de continuer il est nécessaire que l'utilisateur
 connaisse les différentes caractéristiques d'opération
 du circuit à l'étude."

INSTANCE textbox 11 ISA textbox
 WITH location := 10,21,366,46
 WITH pen color := 255,255,0
 WITH fill color := 0,0,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH frame := TRUE
 WITH text := "Les puissance dissipée dans le circuit intégré est de:"

INSTANCE textbox 12 ISA textbox
 WITH location := 478,23,529,44
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 255,255,0
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH frame := TRUE

WITH text := "WATTS"

INSTANCE valuebox 1 ISA valuebox

WITH location := 366,23,477,45

WITH justify IS left

WITH font := "System"

WITH frame := TRUE

WITH clipped := TRUE

WITH attachment := dissip

INSTANCE main window ISA window

WITH location := -1,-1,-1,-1

WITH style IS moveable, sizeable, closeable

WITH title := "(Untitled)"

WITH visible := TRUE

WITH continue display := TRUE

WITH visible OK button := TRUE

RULE Calcul des pertes dans les circuits intégrés

IF compute

AND Vcc > 0

AND Icc > 0

AND pin_out > 0

AND Vol > 0

AND Iol > 0

THEN dissip := Vcc * Icc + (pin_out * (Vol + Iol))

AND output OF main window := resultats

END

Fichier toles.prl de l'application toles.knb

\$VERSION25

\$LOCATIONS ARE PIXELS

CLASS main display

ATTRIBUTE calcul_hyster SIMPLE

WHEN CHANGED

BEGIN

PURSUE pertes_hyster

END

ATTRIBUTE Kf NUMERIC

TEXT "Quelle est la constante Kf des toles considérées ?"

ATTRIBUTE Vf NUMERIC

TEXT "Quel est le volume total en mètres cubes occupé par les toles ?"

```

ATTRIBUTE frequence NUMERIC
  TEXT "Quelle est la fréquence d'opération en Hertz ?"
ATTRIBUTE epaisseur NUMERIC
  TEXT "Quelle est l'épaisseur des toles magnétiques ?"
ATTRIBUTE Bmax NUMERIC
  TEXT "Quelle le champ d'induction Bmaxen Tesla dans le circuit ?"
ATTRIBUTE pertes_hyster NUMERIC
  TEXT "Les pertes par hystérésis pour une telle application sont:"
  SEARCH ORDER CONTEXT RULES DEFAULT
ATTRIBUTE calcul_foucault SIMPLE
  WHEN CHANGED
  BEGIN
    PURSUE pertes_foucault
  END
ATTRIBUTE Kh NUMERIC
  TEXT "Quelle est la constante Kf des toles considérées ?"
ATTRIBUTE pertes_foucault NUMERIC
  SEARCH ORDER CONTEXT RULES DEFAULT

INSTANCE the application ISA application
  WITH unknowns fail := TRUE
  WITH threshold := 50
  WITH title display := display1
  WITH ignore breakpoints := FALSE
  WITH reasoning on := FALSE
  WITH numeric precision := 8
  WITH simple query text := "Is it true that:
  *
is
  *"
  WITH numeric query text := "What is(are):
  *
of
  *"
  WITH string query text := "What is(are):
  *
of
  *"
  WITH time query text := "What is(are):
  *
of
  *"
  WITH interval query text := "What is(are):
  *
of
  *"

```

```

WITH compound query text := "What is(are):
*
of
*"
WITH multicomound query text := "What is(are):
*
of
*"
WITH demon strategy IS fire first
WITH visible file menu := TRUE

```

```

INSTANCE numeric query ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := TRUE
  WITH items [1 ] := promptbox for numeric query
  WITH items [2 ] := numeric query textbox
  WITH items [3 ] := pushbutton 2
  WITH items [4 ] := pushbutton 3

```

```

INSTANCE début ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := pushbutton 1
  WITH items [2 ] := pushbutton 4
  WITH items [3 ] := pushbutton 7
  WITH items [4 ] := UNDETERMINED

```

```

INSTANCE Foucault ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := valuebox 1
  WITH items [2 ] := textbox 9
  WITH items [3 ] := textbox 10
  WITH items [4 ] := pushbutton 8
  WITH items [5 ] := pushbutton 9

```

```

INSTANCE hystérésis ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := textbox 11
  WITH items [2 ] := valuebox 2
  WITH items [3 ] := textbox 12
  WITH items [4 ] := pushbutton 5
  WITH items [5 ] := pushbutton 6

```

```

INSTANCE display1 ISA display

```

```
WITH wait := TRUE
WITH delay changes := FALSE
WITH items [1 ] := picturebox 1
WITH items [2 ] := textbox 13
WITH items [3 ] := pushbutton 10
WITH items [4 ] := pushbutton 11

INSTANCE picturebox 1 ISA picturebox
  WITH location := 9,63,325,384
  WITH clipped := FALSE
  WITH frame := TRUE
  WITH filename := "C:\L5O25\ELEM.BMP"

INSTANCE pushbutton 1 ISA pushbutton
  WITH location := 45,77,221,102
  WITH label := "Pertes par hystérésis"
  WITH attribute attachment := calcul_hyster

INSTANCE pushbutton 2 ISA pushbutton
  WITH location := 43,179,145,212
  WITH label := "sortir"
  WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 3 ISA pushbutton
  WITH location := 414,177,523,212
  WITH label := "continuer"
  WITH attribute attachment := continue display OF main window

INSTANCE pushbutton 4 ISA pushbutton
  WITH location := 45,176,274,203
  WITH label := "Pertes par courants de Foucault"
  WITH attribute attachment := calcul_foucault

INSTANCE pushbutton 5 ISA pushbutton
  WITH location := 418,109,550,140
  WITH label := "sortir"
  WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 6 ISA pushbutton
  WITH location := 27,111,159,142
  WITH label := "retour"
  WITH attribute attachment := restart OF application

INSTANCE pushbutton 7 ISA pushbutton
  WITH location := 425,309,574,342
  WITH label := "sortir"
```

WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 8 ISA pushbutton
 WITH location := 409,161,521,188
 WITH label := "sortir"
 WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 9 ISA pushbutton
 WITH location := 20,167,132,194
 WITH label := "sortir"
 WITH attribute attachment := restart OF application

INSTANCE pushbutton 10 ISA pushbutton
 WITH location := 459,359,563,386
 WITH label := "continuer"
 WITH display attachment := début

INSTANCE pushbutton 11 ISA pushbutton
 WITH location := 340,357,444,384
 WITH label := "sortir"
 WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE textbox 9 ISA textbox
 WITH location := 425,43,516,64
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 255,0,0
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := "Watts/m**3"

INSTANCE textbox 10 ISA textbox
 WITH location := 11,21,312,65
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 255,0,0
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := "Les pertes par courants de Foucault pour une telle appli\ncation sont d'approximativement:"

INSTANCE textbox 11 ISA textbox
 WITH location := 11,21,385,56
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 0,255,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := "Les pertes par hystérésis pour une telle application son\l"

t d'approximativement:"

```

INSTANCE textbox 12 ISA textbox
  WITH location := 482,36,549,58
  WITH pen color := 0,0,255
  WITH fill color := 0,255,255
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH text := "Watts/m**3"

```

```

INSTANCE textbox 13 ISA textbox
  WITH location := 10,2,551,68
  WITH pen color := 255,255,0
  WITH fill color := 0,0,255
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH text := "LABORATOIRE D'ÉLECTROTHERMIE INDUSTRIELLE

```

CALCUL DES PERTES PAR COURANTS DE FOUCAULT ET PAR HYSTÉRÉSIS DANS
LES CI
RCUITS MAGNÉTIQUES"

```

INSTANCE valuebox 1 ISA valuebox
  WITH location := 312,42,424,66
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := pertes_foucault

```

```

INSTANCE valuebox 2 ISA valuebox
  WITH location := 385,34,481,59
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := pertes_hyster

```

```

INSTANCE main window ISA window
  WITH location := -1,-1,-1,-1
  WITH full screen := TRUE
  WITH style IS moveable, sizeable, closeable
  WITH title := "Calcul des pertes fer dans les circuits magnétiques."
  WITH visible := TRUE
  WITH visible OK button := TRUE

```

```

RULE Calcul des pertes par courants de Foucault dans les toles
IF calcul_foucault
AND Kf > 0
AND Vf > 0
AND frequence > 0
AND epaisseur > 0
AND Bmax > 0
THEN pertes_foucault := Kf * Vf * frequence * frequence * epaisseur * ep\
aisseur * Bmax * Bmax
AND output OF main window := Foucault

```

```

RULE Calcul des pertes par hystérésis dans les toles magnétiques
IF calcul_hyster
AND Kh > 0
AND Vf > 0
AND frequence > 0
AND Bmax > 0
THEN pertes_hyster := Kh * Vf * frequence * ( EXP(1.7 * LN( Bmax)))
AND output OF main window := hystérésis

```

END

Fichier semicon.prl de l'application semicon.knb

```

$VERSION25
$LOCATIONS ARE PIXELS

ATTRIBUTE compute SIMPLE
  WHEN CHANGED
    BEGIN
      PURSUE puiss
    END
ATTRIBUTE Io NUMERIC
  TEXT "Quel est en ampères le courant moyen (Io) dans le semiconducteur\
?"
ATTRIBUTE freq_comm NUMERIC
  TEXT "Quelle est la fréquence de commutation du dispositif ?"
ATTRIBUTE Vd NUMERIC
  TEXT "Quelles la tension en volts (Vd) aux bornes du dispositif ?"
ATTRIBUTE Ton NUMERIC
  TEXT "Quel est le temps de conduction en secondes (Ton) du dispositif?\
"
ATTRIBUTE Von NUMERIC
  TEXT "Quelle est la chute de tension en volts (Von) à la conduction
dans le dispositif ?"
ATTRIBUTE Tcon NUMERIC

```


TEXT "Quel est le temps de fermeture en secondes (Tcon) du dispositif \

?"

ATTRIBUTE Tcoff NUMERIC

TEXT "Quel st le temps d'ouverture en secondes (Tcoff) du dispositif ?\

"

ATTRIBUTE puiss NUMERIC

SEARCH ORDER CONTEXT RULES DEFAULT

INSTANCE the application ISA application

WITH unknowns fail := TRUE

WITH threshold := 50

WITH title display := tabuler

WITH conclusion display := resultats

WITH ignore breakpoints := FALSE

WITH reasoning on := FALSE

WITH numeric precision := 8

WITH simple query text := "Is it true that:

*

is

*"

WITH numeric query text := "What is(are):

*

of

*"

WITH string query text := "What is(are):

*

of

*"

WITH time query text := "What is(are):

*

of

*"

WITH interval query text := "What is(are):

*

of

*"

WITH compound query text := "What is(are):

*

of

*"

WITH multicomponent query text := "What is(are):

*

of

*"

WITH demon strategy IS fire first

WITH visible file menu := TRUE

```

INSTANCE numeric query ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := TRUE
  WITH items [1 ] := promptbox for numeric query
  WITH items [2 ] := numeric query textbox
  WITH items [3 ] := pushbutton 2
  WITH items [4 ] := pushbutton 3

```

```

INSTANCE tabuler ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := pushbutton 1
  WITH items [2 ] := pushbutton 4
  WITH items [3 ] := textbox 10

```

```

INSTANCE resultats ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := valuebox 1
  WITH items [2 ] := textbox 9
  WITH items [3 ] := textbox 11
  WITH items [4 ] := pushbutton 5
  WITH items [5 ] := pushbutton 6

```

```

INSTANCE pushbutton 1 ISA pushbutton
  WITH location := 349,111,504,141
  WITH label := "continuer"
  WITH attribute attachment := compute

```

```

INSTANCE pushbutton 2 ISA pushbutton
  WITH location := 311,142,454,167
  WITH label := "continuer"
  WITH attribute attachment := continue display OF main window

```

```

INSTANCE pushbutton 3 ISA pushbutton
  WITH location := 43,148,170,175
  WITH label := "sortir"
  WITH attribute attachment := exit OF application

```

```

INSTANCE pushbutton 4 ISA pushbutton
  WITH location := 12,110,113,136
  WITH label := "sortir"
  WITH attribute attachment := exit OF application

```

```

INSTANCE pushbutton 5 ISA pushbutton

```

WITH location := 423,161,528,197
 WITH label := "sortir"
 WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 6 ISA pushbutton
 WITH location := 121,169,253,201
 WITH label := "retour"
 WITH attribute attachment := restart OF application

INSTANCE pushbutton 7 ISA pushbutton
 WITH location := 365,151,467,183
 WITH label := "continuer"
 WITH display attachment := tabuler

INSTANCE pushbutton 8 ISA pushbutton
 WITH location := 48,151,162,173
 WITH label := "sortir"
 WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE textbox 9 ISA textbox
 WITH location := 1,11,317,52
 WITH pen color := 255,255,0
 WITH fill color := 0,0,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := "La puissance moyenne dissipée par conduction et par conduction dans le dispositif est de:"

INSTANCE textbox 10 ISA textbox
 WITH location := 0,3,403,88
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 0,255,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH frame := TRUE
 WITH text := "Pour faire les différents calculs reliés à la puissance \ de dissipation dans un semiconducteur l'utilisateur doit connaître les caractéristiques d'opération du dispositif. Autrement il est nécessaire d'avoir en main une publication de référence sur le semiconducteur en question."

INSTANCE textbox 11 ISA textbox
 WITH location := 409,24,471,51
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 255,255,255

```

WITH justify IS left
WITH font := "System"
WITH text := "WATTS"

```

```

INSTANCE textbox 12 ISA textbox
  WITH location := 11,11,372,70
  WITH pen color := 255,255,0
  WITH fill color := 0,0,255
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH text := "LABORATOIRE D'ÉLECTROTHERMIE INDUSTRIELLE
CALCUL DES PERTES PAR CONDUCTION ET PAR
COMMUTATION DANS LES SEMICONDUCTEURS"

```

```

INSTANCE valuebox 1 ISA valuebox
  WITH location := 317,25,403,51
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := puiss

```

```

INSTANCE main window ISA window
  WITH location := -1,-1,-1,-1
  WITH full screen := TRUE
  WITH style IS moveable, sizeable, closeable
  WITH title := " CALCUL DES PERTES DANS LES SEMICONDUCTEURS"
  WITH visible := TRUE
  WITH continue display := TRUE
  WITH visible OK button := TRUE

```

```

RULE Calcul des pertes dans les semiconducteurs
IF compute
AND Io > 0
AND freq_comm > 0
AND Von > 0
AND Ton > 0
AND Vd > 0
AND Tcon > 0
AND Tcoff > 0
THEN puiss := Io * freq_comm * (Von * Ton + ((Vd * (Tcon + Tcoff)) / 2))
AND output OF main window := resultats

```

```

END

```

Fichier radiat.prl de l'application radiat.knb

```

$VERSION25
$LOCATIONS ARE PIXELS

ATTRIBUTE calcul SIMPLE
  WHEN CHANGED
  BEGIN
    PURSUE h_rad
  END
ATTRIBUTE e1 NUMERIC
  TEXT "Quel est le coefficient d'emissivité de la surface 1?"
ATTRIBUTE e2 NUMERIC
  TEXT "Quel est le coefficient d'emissivité de la surface 2 ?"
ATTRIBUTE h NUMERIC
  TEXT "Quelle est la distance h entre les deux plaques ?"
ATTRIBUTE b NUMERIC
  TEXT "Quelle est la largeur b des plaques ?"
ATTRIBUTE T1 NUMERIC
  TEXT "Quelle est la température de la surface 1 ?"
ATTRIBUTE T2 NUMERIC
  TEXT "Quelle est la température de la surface 2 ?"
ATTRIBUTE e_equiv NUMERIC
  SEARCH ORDER CONTEXT RULES DEFAULT
ATTRIBUTE fact_forme NUMERIC
  SEARCH ORDER CONTEXT RULES DEFAULT
ATTRIBUTE h_rad NUMERIC
  WHEN NEEDED
  BEGIN
    
$$h\_rad := (e\_equiv * fact\_forme * 0.00567 * ( \exp(4 * \ln( (T1 + 273) / 100)) - \exp( 4 * \ln( (T2 + 273) / 100))) ) / (T1 - T2)$$

    output OF main window := resultatats
  END
  SEARCH ORDER WHEN NEEDED
ATTRIBUTE configuration COMPOUND
  plaque_parallele,
  plaque_perpend,
  petite_surface,
  concentrique,
  quelconque
  QUERY FROM système
ATTRIBUTE largeur1 NUMERIC
  TEXT "Quelle est la largeur en mètres de la plaque 1?"
ATTRIBUTE largeur2 NUMERIC
  TEXT "Quelle est la largeur en mètres de la plaque 2 ?"

```

ATTRIBUTE A1 NUMERIC

TEXT "Quelle est en mètres carrés la valeur de la surface 1 ?"

ATTRIBUTE A2 NUMERIC

TEXT "Quelle est en mètres carrés la valeur de la surface 2 ?"

ATTRIBUTE L1 NUMERIC

TEXT "Quelle est la longueur L1 en mètre ?"

ATTRIBUTE L3 NUMERIC

TEXT "Quelle est la longueur L3 en mètres ?"

ATTRIBUTE L4 NUMERIC

TEXT "Quelle est la longueur L4 en mètres ?"

ATTRIBUTE L5 NUMERIC

TEXT "Quelle est la longueur L5 en mètres ?"

ATTRIBUTE L6 NUMERIC

TEXT "Quelle est la longueur L6 en mètres ?"

INSTANCE the application ISA application

WITH unknowns fail := TRUE

WITH threshold := 50

WITH title display := valeur_emiss

WITH ignore breakpoints := FALSE

WITH reasoning on := FALSE

WITH numeric precision := 8

WITH simple query text := "Is it true that:

*

is

*)"

WITH numeric query text := "What is(are):

*

of

*)"

WITH string query text := "What is(are):

*

of

*)"

WITH time query text := "What is(are):

*

of

*)"

WITH interval query text := "What is(are):

*

of

*)"

WITH compound query text := "What is(are):

*

of

*)"

```

WITH multicomponent query text := "What is(are):
*
of
*"

```

```

WITH demon strategy IS fire first
WITH visible file menu := TRUE

```

```

INSTANCE numeric query ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := TRUE
  WITH items [1 ] := promptbox for numeric query
  WITH items [2 ] := numeric query textbox
  WITH items [3 ] := pushbutton 11
  WITH items [4 ] := pushbutton 12

```

```

INSTANCE valeur_émiss ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := textbox 9
  WITH items [2 ] := UNDETERMINED
  WITH items [3 ] := UNDETERMINED
  WITH items [4 ] := pushbutton 8
  WITH items [5 ] := pushbutton 9
  WITH items [6 ] := UNDETERMINED
  WITH items [7 ] := UNDETERMINED
  WITH items [8 ] := UNDETERMINED
  WITH items [9 ] := true false box 2

```

```

INSTANCE émiss_equ ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := textbox 10
  WITH items [2 ] := textbox 11
  WITH items [3 ] := textbox 12
  WITH items [4 ] := textbox 13
  WITH items [5 ] := textbox 14

```

```

INSTANCE système ISA display
  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := textbox 15
  WITH items [2 ] := picturebox 2
  WITH items [3 ] := picturebox 3
  WITH items [4 ] := picturebox 4
  WITH items [5 ] := picturebox 5
  WITH items [6 ] := picturebox 6

```

```

WITH items [7 ] := UNDETERMINED
WITH items [8 ] := UNDETERMINED
WITH items [9 ] := UNDETERMINED
WITH items [10 ] := UNDETERMINED
WITH items [11 ] := UNDETERMINED
WITH items [12 ] := pushbutton 6
WITH items [13 ] := pushbutton 7
WITH items [14 ] := radiobutton group 2
WITH items [15 ] := textbox 16
WITH items [16 ] := textbox 17
WITH items [17 ] := textbox 18
WITH items [18 ] := textbox 19
WITH items [19 ] := textbox 20

```

```

INSTANCE resulatats ISA display

```

```

  WITH wait := TRUE
  WITH delay changes := FALSE
  WITH items [1 ] := textbox 21
  WITH items [2 ] := valuebox 1
  WITH items [3 ] := textbox 22
  WITH items [4 ] := pushbutton 5
  WITH items [5 ] := pushbutton 10
  WITH items [6 ] := textbox 23
  WITH items [7 ] := valuebox 2
  WITH items [8 ] := textbox 24
  WITH items [9 ] := valuebox 3

```

```

INSTANCE picturebox 2 ISA picturebox

```

```

  WITH location := 0,69,147,219
  WITH clipped := TRUE
  WITH frame := TRUE
  WITH picture := "L5G00000.bmp"

```

```

INSTANCE picturebox 3 ISA picturebox

```

```

  WITH location := 160,70,353,197
  WITH clipped := TRUE
  WITH frame := TRUE
  WITH picture := "L5G00001.bmp"

```

```

INSTANCE picturebox 4 ISA picturebox

```

```

  WITH location := 180,250,325,373
  WITH clipped := TRUE
  WITH frame := TRUE
  WITH picture := "L5G00002.bmp"

```

```

INSTANCE picturebox 5 ISA picturebox

```


WITH location := 394,0,564,108
WITH clipped := TRUE
WITH frame := TRUE
WITH picture := "L5G00003.bmp"

INSTANCE picturebox 6 ISA picturebox
WITH location := 0,249,171,373
WITH clipped := TRUE
WITH frame := TRUE
WITH picture := "L5G00004.bmp"

INSTANCE pushbutton 6 ISA pushbutton
WITH location := 385,376,469,398
WITH label := "sortir"
WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 7 ISA pushbutton
WITH location := 505,377,587,398
WITH label := "continuer"
WITH attribute attachment := continue display OF main window

INSTANCE pushbutton 8 ISA pushbutton
WITH location := 50,351,122,372
WITH label := "sortir"
WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 9 ISA pushbutton
WITH location := 344,351,426,376
WITH label := "continuer"
WITH attribute attachment := calcul

INSTANCE pushbutton 5 ISA pushbutton
WITH location := 49,212,171,241
WITH label := "retour"
WITH attribute attachment := restart OF application

INSTANCE pushbutton 10 ISA pushbutton
WITH location := 428,210,550,239
WITH label := "sortir"
WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE pushbutton 11 ISA pushbutton
WITH location := 424,158,534,185
WITH label := "continuer"
WITH attribute attachment := continue display OF main window

INSTANCE pushbutton 12 ISA pushbutton
 WITH location := 27,162,128,186
 WITH label := "sortir"
 WITH attribute attachment := exit OF application

INSTANCE radiobutton group 2 ISA radiobutton group
 WITH location := 391,149,575,359
 WITH pen color := 255,255,0
 WITH fill color := 0,0,255
 WITH frame := FALSE
 WITH group label := "configuration"
 WITH show current := TRUE
 WITH attachment := configuration

INSTANCE textbox 9 ISA textbox
 WITH location := 20,30,373,322
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 0,255,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH frame := TRUE
 WITH text := "EMISSIVITÉ DE CERTAINS MATÉRIAUX À 100° C.

Matière	Emissivité, e
Acier poli	0.06
Aluminium poli	0.06
Aluminium en feuille	0.09
Aluminium anodisé	0.81
Argent	0.02-0.032
Caoutchouc	0.86-0.94
Cuivre poli	0.023-0.052
Eau (32-212°F)	0.95-0.96
Fer poli	0.14-0.38
Fonte	0.44
Laiton poli	0.06
Or poli	0.018-0.035
Plomb	0.28
Vitre	0.85-0.95
Zinc galvanisé en feuille	0.23

"

INSTANCE textbox 10 ISA textbox
 WITH location := -2,38,373,127
 WITH pen color := 0,0,255

WITH fill color := 0,255,255

WITH justify IS left

WITH font := "System"

WITH frame := TRUE

WITH text := "

1

Plans paralleles infinis e equivalent =
$$\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1$$

INSTANCE textbox 11 ISA textbox

WITH location := 0,128,253,219

WITH pen color := 0,0,255

WITH fill color := 255,255,0

WITH justify IS left

WITH font := "System"

WITH frame := FALSE

WITH text := "

Surface 1 entourée par une surface 2

"

INSTANCE textbox 12 ISA textbox

WITH location := -2,220,470,270

WITH pen color := 255,255,0

WITH fill color := 0,0,255

WITH justify IS left

WITH font := "System"

WITH frame := TRUE

WITH text := "

Petite surface 1 entourée par une surface 2 e equivalent = e1"

INSTANCE textbox 13 ISA textbox

WITH location := 253,128,504,220

WITH pen color := 0,0,255

WITH fill color := 255,255,0

WITH justify IS left

WITH font := "System"

WITH text := " 1

e equivalent =
$$\frac{1}{e_1} + \frac{A_1}{A_2} \frac{1 - e_2}{e_2}$$

"

INSTANCE textbox 14 ISA textbox

WITH location := 0,268,387,321

WITH pen color := 255,255,0

WITH fill color := 0,0,0

WITH justify IS left

WITH font := "System"

WITH text := "

Deux surfaces quelconques e équivalent = $e_1.e_2$ "

INSTANCE textbox 15 ISA textbox

WITH location := -1,0,363,65

WITH pen color := 0,0,255

WITH fill color := 0,255,255

WITH justify IS left

WITH font := "System"

WITH text := "Quel est la configuration qui ressemble le plus au système à l'étude ?

FAITES UN CHOIX SUR LE TABLEAU DE DROITE S.V.P."

INSTANCE textbox 16 ISA textbox

WITH location := 32,219,147,244

WITH pen color := 255,255,0

WITH fill color := 0,0,255

WITH justify IS left

WITH font := "System"

WITH text := "plaque_parallèle"

INSTANCE textbox 17 ISA textbox

WITH location := 235,196,353,225

WITH pen color := 255,255,0

WITH fill color := 0,0,255

WITH justify IS left

WITH font := "System"

WITH text := "plaque_perpend."

INSTANCE textbox 18 ISA textbox

WITH location := 210,374,327,400

WITH pen color := 255,255,0

WITH fill color := 0,0,255

WITH justify IS left

WITH font := "System"

WITH text := "petite_surface 1 "

INSTANCE textbox 19 ISA textbox

WITH location := 70,374,172,397
 WITH pen color := 255,255,0
 WITH fill color := 0,0,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := "concentrique 1"

INSTANCE textbox 20 ISA textbox
 WITH location := 449,108,563,137
 WITH pen color := 255,255,0
 WITH fill color := 0,0,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := "surf_quelconque"

INSTANCE textbox 21 ISA textbox
 WITH location := 9,119,294,154
 WITH pen color := 0,0,255
 WITH fill color := 0,255,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH frame := TRUE
 WITH text := "Le coefficient de transfert de chaleur par radiation pou
 r une telle application est de:"

INSTANCE textbox 22 ISA textbox
 WITH location := 376,131,477,155
 WITH pen color := 255,255,0
 WITH fill color := 0,0,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH frame := TRUE
 WITH text := "KWatts/m**2.C"

INSTANCE textbox 23 ISA textbox
 WITH location := 9,11,437,35
 WITH pen color := 255,255,0
 WITH fill color := 0,0,255
 WITH justify IS left
 WITH font := "System"
 WITH text := "Le coefficient d'emissivité équivalent pour un tel systè
 me est de:"

INSTANCE textbox 24 ISA textbox
 WITH location := 9,51,371,74
 WITH pen color := 255,255,0

```

WITH fill color := 0,0,255
WITH justify IS left
WITH font := "System"
WITH text := "Le facteur de forme dans une telle configuration est de:\n"

```

```

INSTANCE true false box 2 ISA true false box
  WITH location := 438,104,543,156
  WITH true label := "oui"
  WITH false label := "non"
  WITH show current := TRUE

```

```

INSTANCE valuebox 1 ISA valuebox
  WITH location := 294,130,376,155
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := h_rad

```

```

INSTANCE valuebox 2 ISA valuebox
  WITH location := 436,13,508,34
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := e_equiv

```

```

INSTANCE valuebox 3 ISA valuebox
  WITH location := 370,52,462,74
  WITH justify IS left
  WITH font := "System"
  WITH frame := TRUE
  WITH clipped := TRUE
  WITH attachment := fact_forme

```

```

INSTANCE main window ISA window
  WITH location := -1,-1,-1,-1
  WITH style IS moveable, sizeable, closeable
  WITH title := "(Untitled)"
  WITH visible := TRUE
  WITH continue display := TRUE
  WITH visible OK button := TRUE

```

```

RULE Calcul de hr des surfaces concentriques
IF calcul

```

```

AND configuration IS concentrique
AND e1 > 0
AND e2 > 0
AND A1 > 0
AND A2 > 0
AND T1 <> 0
AND T2 <> 0
THEN e_equiv := 1 / ((1 / e1) + (A1 / A2) * ((1 / e2) - 1))
AND fact_forme := 1

```

RULE Calcul de hr pour des plaques parallèles

```

IF calcul
AND configuration IS plaque_parallele
AND e1 > 0
AND e2 > 0
AND h > 0
AND b > 0
AND T1 <> 0
AND T2 <> 0
THEN e_equiv := 1 / ((1 / e1) + (1 / e2) - 1)
AND fact_forme := SQRT( 1 + SQR( h / b)) - (h / b)

```

RULE Calcul de hr pour des plaques perpendiculaires

```

IF calcul
AND configuration IS plaque_perpend
AND e1 > 0
AND e2 > 0
AND largeur1 > 0
AND largeur2 > 0
AND T1 <> 0
AND T2 <> 0
THEN e_equiv := e1 * e2
AND fact_forme := (1 + (largeur2 / largeur1) - SQRT( 1 + SQR( largeur2 /
largeur1)))) / 2

```

RULE Calcul de hr pour des surfaces quelconques

```

IF calcul
AND configuration IS quelconque
AND e1 > 0
AND e2 > 0
AND L1 > 0
AND L3 >= 0
AND L4 >= 0
AND L5 >= 0
AND L6 >= 0
AND T1 <> 0

```

```
AND T2 <> 0  
THEN e_equiv := e1 * e2  
AND fact_forme := ((L3 + L4) - (L5 + L6)) / (2 * L1)
```

RULE Calcul de hr pour une petite surface entourée d'une autre

IF calcul

AND configuration IS petite_surface

AND e1 > 0

AND T1 <> 0

AND T2 <> 0

THEN e_equiv := e1

AND fact_forme := 1

END